

MECAS ESI
S.R.O.

Brojova 2113/16, 326 00 Plzeň

tel. +420 377 432 931

fax +420 377 432 930

Certifikovaná metodika pro přípravu numerických modelů a simulaci průjezdu kolejového vozidla


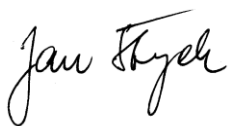

Metodika vznikla za částečně finančně spoluúčasti TA ČR v rámci projektu TH02010775.

2019

Autoři: Robert Fiedler
Zdeněk Novotný
Luděk Kovář

Název zprávy: Metodický postup pro přípravu numerických modelů pro simulací průjezdu kolejového vozidla

Číslo zprávy: M_Z_19_003_r01

Vypracoval:	Zkontroloval:	Schválil:
Ing. Robert Fiedler  Datum: 20.10.2019	Dr. Ing. Jan Štych  Datum: 23.10.2019	Ing. Luděk Kovář, Ph.D  Datum: 29.10.2019

Obsah

1	Úvod	4
2	Cíl metodiky	4
3	Popis metodiky	4
3.1	Metodický postup pro výpočet vyzařování hluku interakce železničního kola a tratě	4
3.1.1	Definice základních pojmů	5
3.2	Krok 1: Metodický postup pro přípravu numerického modelu železniční tratě	7
3.2.1	Měření dynamických vlastností tratě	7
3.2.2	Určení vlastností podloží a pružných podložek	8
3.2.3	FEM model tratě	10
3.3	Krok 2 - Metodický postup pro přípravu numerického modelu železničního kola	15
3.3.1	Měření železničního dvojkolí	16
3.3.2	FEM model železničního dvojkolí	17
3.4	Krok 3 - Výpočet vyzářeného výkonu od interakce kola s kolejnicí	21
3.5	Metodický postup pro tvorbu modelu průjezdu	22
3.5.1	Měření vnějšího hluku při průjezdu	22
3.5.2	Model průjezdu vlaku s podvozky	26
3.5.3	Virtuální mikrofony pro popis průjezdu	28
3.5.4	Výpočet hluku od průjezdu vlaku	28
3.5.5	Validace modelu a porovnání výsledků simulace s měřením	30
4	Novost postupů a zdůvodnění metodiky	32
5	Popis uplatnění certifikované metodiky	32
6	Ekonomické aspekty	33
7	Literatura	33

1 Úvod

Vzhledem k vysokému podílu exportu kolejových vozidel vyrobených v ČR, je nezbytné udržet a podpořit jejich vysokou konkurenceschopnost. Jedním z častých faktorů hodnocení kvality je předepsaná maximální úroveň hluku projíždějící soupravy. Maximální úrovně vyzářeného hluku jsou doporučeny předpisem TSI a v mnoha případech ještě zpřísněny požadavkem zákazníka.

Řešení hluku průjezdu se tak stává jednou z hlavních priorit a jsou neoddělitelnou součástí při hodnocení projektů a tendrů. Pomocí navržené metodiky, založené na numerických simulacích, lze odhadnout hluk vozu nebo i soupravy vozů a poskytnout tak přímou konkurenční výhodu výrobcům kolejových vozidel, kteří vytvořenou metodiku zahrnou do svého vývojového cyklu.

Vytvořenou metodiku je také možné využít pro optimalizaci charakteristik kolejového svršku, a tedy pro minimalizaci hluku při průjezdu kolejového vozidla.

2 Cíl metodiky

Cílem této metodiky je stanovení postupu stavby modelů železniční tratě a železničního kola nezbytných pro výpočet vyzářovaného hluku kolejového vozidla způsobeného kontaktem kola s kolejnicí. Pomocí této metodiky lze sestavit numerické modely kola, viz kapitola [3.3], tratě, viz kapitola [3.2], a okolí s vozem, viz kapitola [3.5], a predikovat naměřený hluk při schvalovacích zkouškách vozidla. Výpočet zohledňuje požadavky normy ČSN EN ISO 3095 [1] (Měření hluku vyzářovaného kolejovými vozidly), podle které se provádí hluková schvalovací zkouška.

Cílem metodiky je sestavení uceleného procesu, skládajícího se z kroků nezbytných pro výpočet predikce hluku průjezdu vlaku.

Primárně je proces zaměřen na generaci hluku od interakce železničního kola s kolejnicí, viz kapitola [3.1] se zaměřením na stavbu FEM-BEM detailních akustických modelů v softwaru VA One [9] a s tím související nezbytná měření pro validaci. Výsledkem interakce kola s kolejnicí je vyzářený akustický výkon, který je aplikován do modelu sestavy vozů pro simulaci průjezdu, viz kapitola [3.5].

Metodika popisuje stavbu 3D modelu vlaku a přípravu modelu pro simulaci průjezdu pomocí geometrické metody Raytracing. Dále představuje použití softwarového modulu [2] pro zpracování hluku vyzářovaného podvozkem při průjezdu kolejového vozidla s vyhodnocením hluku průjezdu dle ČSN EN ISO 3095 [1].

3 Popis metodiky

3.1 Metodický postup pro výpočet vyzářování hluku interakce železničního kola a tratě

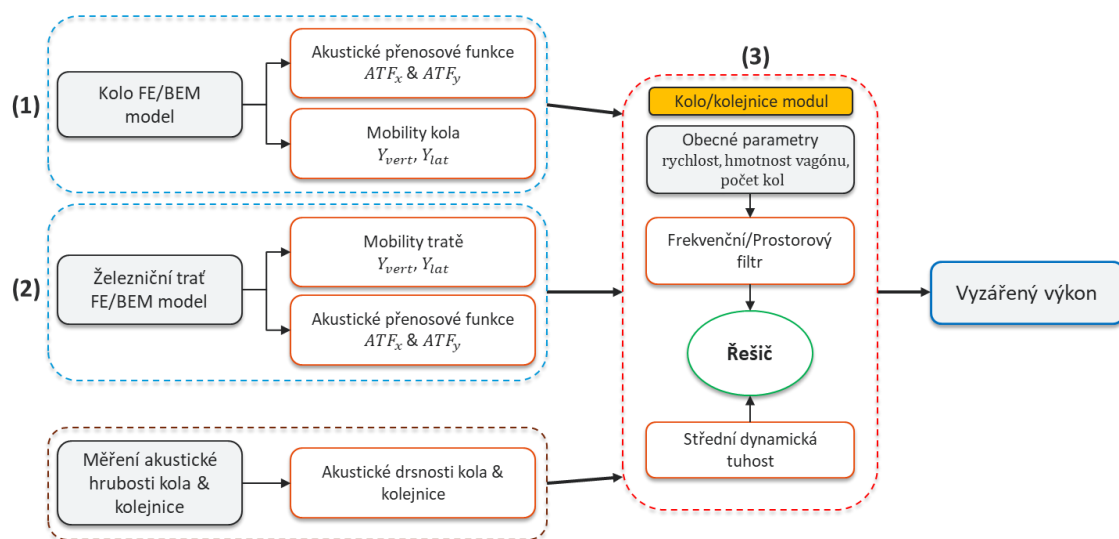
Určení a modelování hluku od kontaktu kola a kolejnice je komplexní problém, vyžadující správné skloubení řady výsledků numerických analýz a experimentálního měření. Pro výpočet vyzářování hluku byl vyvinut nástroj pro odhad hluku valení "Wheel-Rail Noise modul", viz [2], který vychází z matematického modelu vzájemné interakce kola s kolejnicí. Nástroj umožňuje výpočet vyzářeného výkonu v závislosti na rychlosti vlaku, hmotnosti vagónu, charakteristik kola a kolejnice a dalších parametrů soupravy. Pro navrhnutý metodický postup lze použít jak změřené

přenosové křivky, tak křivky spočtené pomocí numerických modelů jednotlivých komponent (kolo, trať).

Nástroj Wheel-Rail Noise module umožňuje:

- definici úlohy pomocí parametrů a křivek charakterizujících kolo, kolejnici,
- tvorbu vlastní databáze kol a tratí,
- grafické vyhodnocování křivek,
- textový výstup budící síly a vyzářeného akustického výkonu pro kolo a kolejnici.

Metodický proces tvorby matematického modelu a získání vyzářeného výkonu interakce kola s tratí je schematicky znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Schématický popis procesu modelování vyzářeného výkonu interakce kola a kolejnice

Proces lze rozdělit na několik dílčích částí:

- **Krok 1: Tvorba modelu železniční tratě** (FEM, BEM) pro extrakci akustických přenosových funkcí a mobility, viz kapitola [3.2]
- **Krok 2: Tvorba modelu železničního kola** (FEM, BEM) pro extrakci akustických přenosových funkcí a mobility, viz kapitola [3.3]
- **Krok 3: Výpočet vyzářeného akustického výkonu** od interakce kola a kolejnice pomocí nástroje Wheel-Rail Noise module, viz kapitola [3.4]

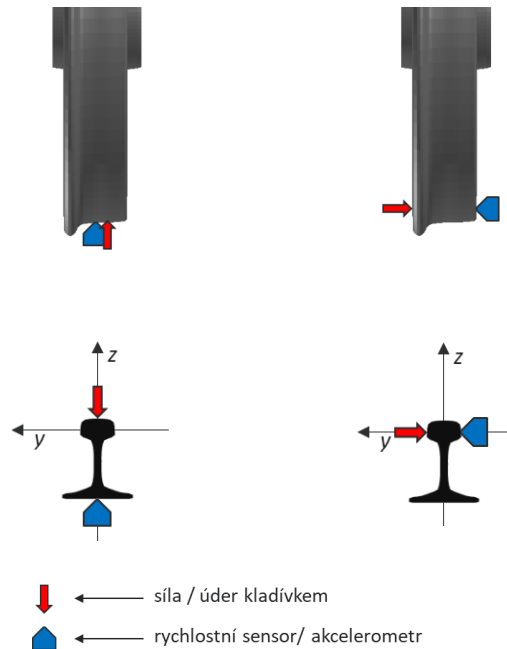
3.1.1 Definice základních pojmů

3.1.1.1 Mechanická pohyblivost (mobilita)

Veličina charakterizuje dynamické chování tělesa od jednotkové síly v místě buzení, v angl. literatuře značená jako $Y \left[\frac{s}{kg} \right]$ neboli mobilita, a je definována jako podíl rychlosti kmitání v místě snímače v [m/s] a na něj působící síly F [N], viz vztah

$$Y = \frac{v}{F} \quad (1)$$

Při měření se síla snímá v kladívku a odezva se měří co nejbližěji k impaktnímu místu v příslušném směru tak, jak je znázorněno na Obr. 2.



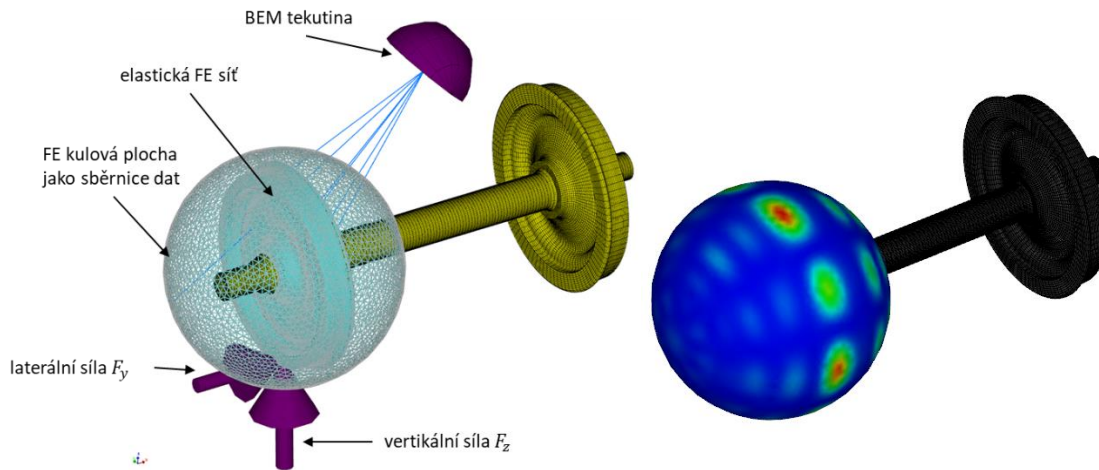
Obr. 2: Měření mechanické pohyblivosti (mobility) ve vertikálním a laterálním směru na železniční trati a kole

3.1.1.2 Akustická přenosová funkce (Acoustic Transfer Function)

Akustická přenosová funkce, v anglické literatuře "Acoustic Transfer Function" $ATF [W]$, popisuje závislost vyzářeného akustického výkonu $P_{rad} [W]$, který systém vyzáří při zatížení jednotkovou silou F o amplitudě $1 N$, viz následující vztah

$$ATF = \frac{P_{rad}}{F}, \quad (2)$$

kde $P_{rad} [W]$ je akustický výkon, který je vypočten z intenzity přes plochu kolem tělesa.



Obr. 3: Příklad výpočetního modelu na získání akustického výkonu jednoho disku železničního dvojkolí

3.2 Krok 1: Metodický postup pro přípravu numerického modelu železniční tratě

Model tratě je zjednodušen na kolejnici, systém pružin, kmitajících hmot reprezentujících dynamické vlastnosti podloží a pružných podložek mezi kolejnicí a pražci [3]. Pro určení dynamických vlastností podloží je nutné provést měření dynamické lokální odezvy tratě (měření mobility). Numerický model je následně naladěn pomocí dat z měření tak, aby co nejpřesněji popisoval chování tratě pod zatížením.

3.2.1 Měření dynamických vlastností tratě

3.2.1.1 Měření odezvy kolejnice

Měření se provádí ve smyslu normy ČSN EN 15461+A1:2011 [4]. Není potřeba však provádět měření v celém rozsahu, jak ho tato norma požaduje.

Měří se zrychlení v příčném a svislém směru po vybuzení kolejnice rázovým kladívkem a zároveň se měří síla vyvinutá kladívkem, viz Obr. 4. Snímače jsou umístěny na „pevné“ pozici. Kolejnice se budí rázy kladívka na různých místech.

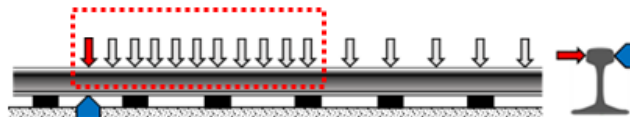
Síť budících bodů je uvedena v ČSN EN 15461 [4]. Měření akcelerance (funkce frekvenční odezvy) pro účely této metodiky nemusí být provedeno pro všechny body, které požaduje tato norma. Pro validaci numerického modelu postačuje prvních jedenáct pozic, viz Obr. 5. Data by měla být zaznamenávána s co nejvyšší možnou frekvencí pro správné zachycení úderu kladívkem.

Z naměřených hodnot se vypočítá mobilita. Pro lepší vypovídající schopnost by měla být každá akcelerance či mobilita stanovena průměrem z minimálně čtyř platných impulzních buzení.

Zkouška se provádí na vnitřní i vnější kolejnici. Umístění snímačů se volí v závislosti na výskytu svaru či jiných nepravidelností koleje s dodržением minimální vzdálenosti snímačů od dané nepravidelnosti.



Obr. 4: Impedanční kladívko, snímače zrychlení

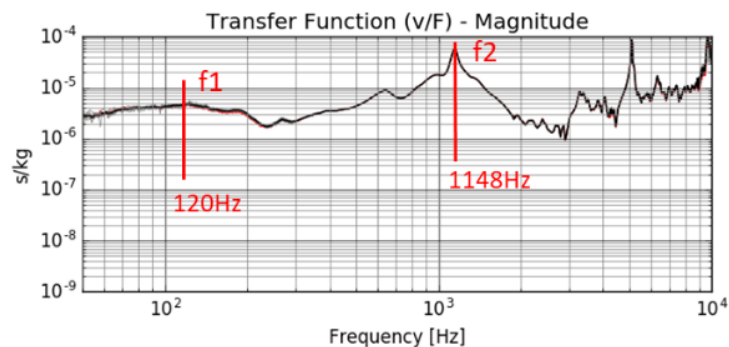


Obr. 5: Rozmístění budících míst

3.2.2 Určení vlastností podloží a pružných podložek

3.2.2.1 Odhad vlastních frekvencí

Pro výpočet tuhostních parametrů tratě je nutné z naměřených dat určit první dvě charakteristické špičky odezvy, viz Obr. 6. První špička f_1 odpovídá frekvenci kmitání vrstvy štěrku a vyjadřuje tuhost podloží. Druhá špička f_2 odpovídá frekvenci kmitání podložky a vyjadřuje tuhost pryžové podložky.



Obr. 6: Identifikace módů tratě ze změřené křivky mechanické pohyblivosti (mobility) tratě

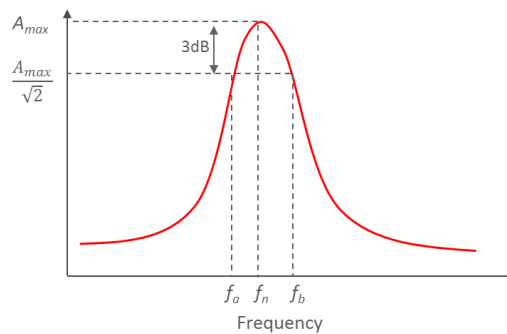
Identifikované frekvence jsou klíčové pro odhad tuhosti podloží a tuhosti pružné podložky.

3.2.2.2 Odhad útlumu

Hodnoty útlumů η (DLF , Damping Loss Factor) štěrku DLF_1 a podložek DLF_2 lze odhadnout z naměřených závislostí pomocí metody Polovičního výkonu, pokles odezvy o 3 dB (Half-power bandwidth method). Tlumení je definováno vztahy

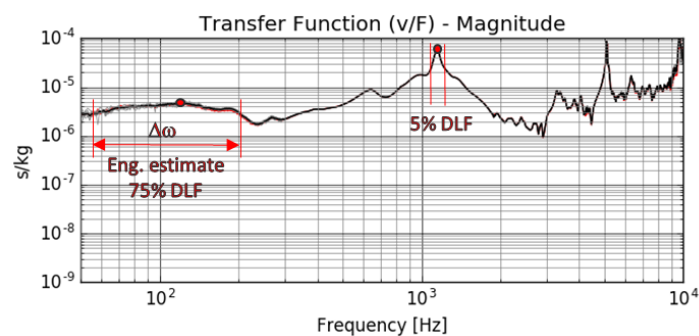
$$\xi = \frac{f_b - f_a}{2f_n} \quad (3)$$

$$\eta = 2\xi \quad (4)$$



Obr. 7: Výpočet tlumení pomocí poklesu o 3 dB

Příklad aplikace metody na reálná data, a tedy odhad tlumení tratě je znázorněn na Obr. 8.

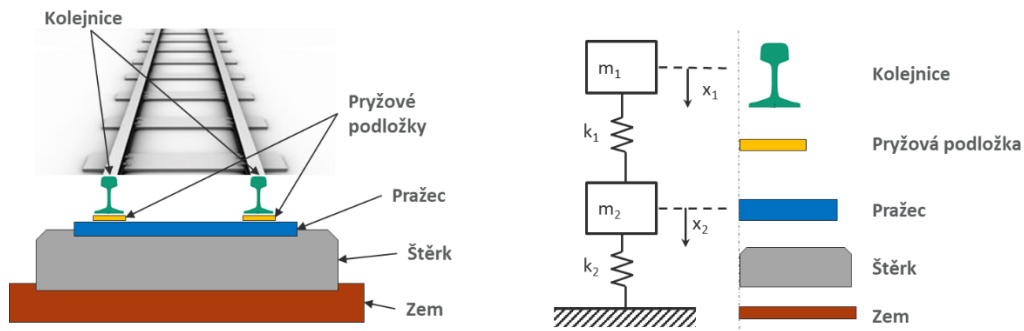


Obr. 8: Změřená křivka mechanické pohyblivosti (mobility) tratě a odhad útlumů štěrků (75%) a pružné podložky (5%) pomocí metody Half-power bandwidth

Odhad tlumení slouží jako první iterace, která se dále zpřesňuje na základě porovnání výsledků simulace a měření. Tyto parametry jsou specifické pro danou trať a nedají se zevšeobecnit nebo odhadnout z materiálových vlastností.

3.2.2.3 Odhad tuhostí podloží a pryžových podložek

Trať si lze představit jako soubor hmot a pružin, který se dá popsat matematickým analytickým modelem. Pro zjednodušení se v pohybových rovnicích neuvažuje tlumení a hmotnost pružných podložek, které jsou zanedbatelné vůči ostatním komponentám tratě.



Obr. 9: 1D matematický model jedné poloviny tratě

Neznámé jsou zde vlastnosti ideálních pružin k_1 , k_2 , které reprezentují podložku, popřípadě štěrku. Ty lze identifikovat z matematického modelu jedné poloviny tratě, kde m_1 vyjadřuje efektivní hmotnost kolejnice (hmotnost kolejnice připadající na jeden pražec) a m_2 efektivní hmotnost pražce odpovídající jedné polovině hmotnosti celého pražce. Soustavu popisující matematický model lze nahlédnout, viz níže.

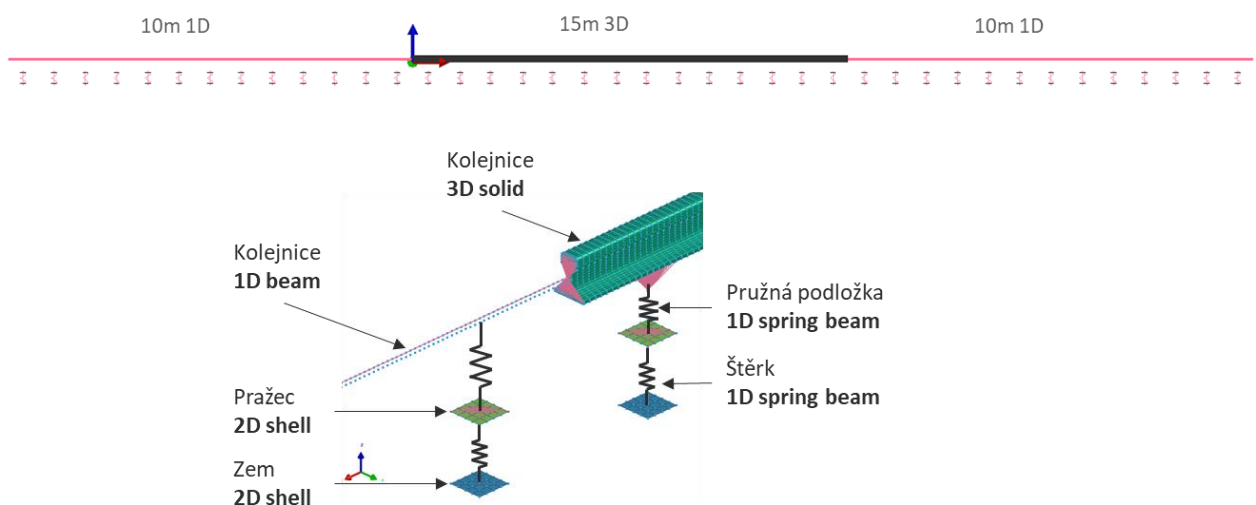
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Úlohu lze řešit pomocí inverzního problému vlastních čísel.

3.2.3 FEM model tratě

Při modelování se vychází z výkresové dokumentace průřezu, momentů setrvačnosti kolejnice (I_{xx} , I_{yy}) a změřeného rozestupu mezi pražci.

Na určení vyzářeného výkonu z kolejnice se uvažuje kolejnici o celkové délce 35 m, kde samotná kolej je rozdělena na tři hlavní části. Centrální část o délce 15 m je tvořena objemovými prvky a bude se z ní určovat vyzářený výkon. Po stranách jsou dva 10 m úseky tvořeny 1D nosníkovými elementy, které jsou primárně důležité pro simulaci útlumu energie šířící se kolejnici.



Obr. 10: Detail modelu tratě

Pro správnou definici 1D nosníkových elementů je třeba získat geometrické charakteristiky průřezu kolejnice – obvod, plochu, těžiště, kvadratické momenty setrvačnosti a polární moment setrvačnosti. Vlastnosti pružinových elementů (šterk, podložka) jsou již známé, viz předchozí kapitola. Pražce jsou reprezentovány pouze pomocí hmotnosti rozložené na 2D skořepinových elementech.

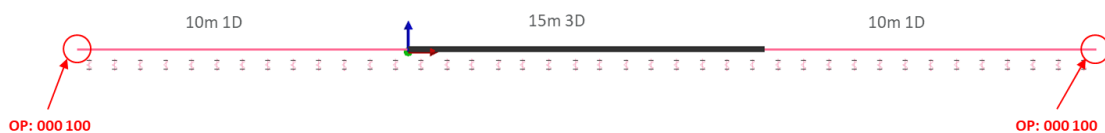
3.2.3.1 Okrajové podmínky

Na modelu je nutné správně zredukovat stupně volnosti, a tedy aplikovat okrajové podmínky na podloží (zem), pražec, konce kolejnice a úseky kolejnice nad pražcem, aby se model co nejvíce přiblížil chování reálné trati.

Napojení 1D a 3D kolejnice je nutné realizovat pomocí svazující podmínky mezi posledním uzlem hraničního 1D elementu a více uzly průřezu 3D sítě (např. ve VPS: MTOCO - Multiple-to-one constraint). Obdobně připojíme 1D pružinové elementy (pružná podložka, šterk) ke kolejnici a zemi. Výhodou tohoto přístupu je zjednodušené aplikování okrajových podmínek více uzlům najednou. Podmínka aplikovaná na centrální uzel je přenášena na všechny provázané uzly.

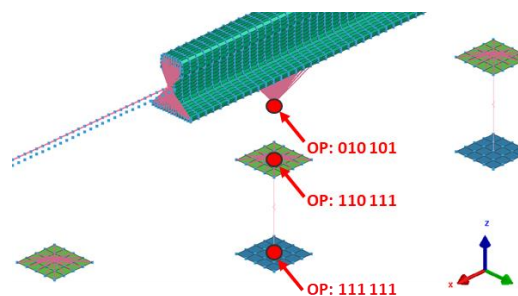
Okrajové podmínky lze označit $T_x T_y T_z R_x R_y R_z$, kde T jsou posuvy (translace) a R rotace. Hodnota 1 označuje odebraný a 0 ponechaný stupeň volnosti.

Volným koncům kolejnice zamezíme v rotaci kolem podélné osy kolejnice (000 100).



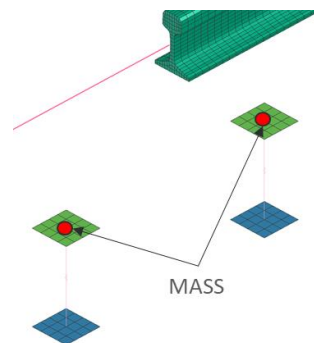
Obr. 11: okrajové podmínky na volných koncích modelu tratě

Zem tvoří tuhý základ (111 111). Pražec reprezentovaný 2D prvky se může pohybovat pouze vertikálně (110 111). Část kolejnice, která je pevně připevněna k pružné podložce, se nesmí pohybovat do stran ve směru osy Y, ale má povolené rotace pouze okolo této osy (010 101).



Obr. 12: Okrajové podmínky na kolejnici, pražci a zemi

Hmotnost pražce se definuje přidáním lokální hmoty do středového uzlu pražce (VPS: MASS – Added mass). Modeluje se jen polovina tratě a betonový železniční pražec váží přibližně 300 kg. Aplikuje se tedy do každého pražce přidaná hmotnost 150 kg.

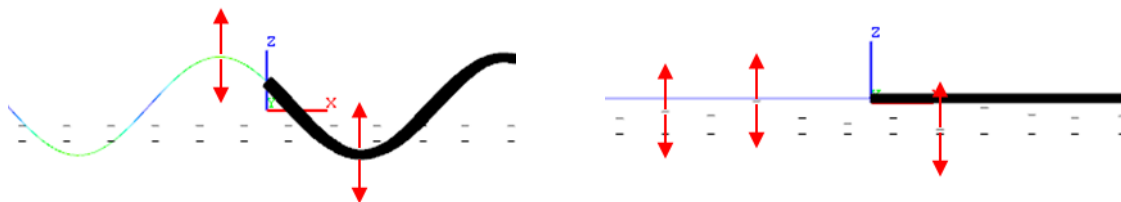


Obr. 13: Umístění přidaných hmotností reprezentujících polovinu hmotnosti pražce

3.2.3.2 Modální analýza

Pro realizaci výpočtu odezvy tratě na silové buzení je nutné získat vlastní frekvence a vlastní tvary (módy) minimálně pro 1.4-násobek cílové frekvence. Pro numerické simulace bude postačovat $F_{max} = 6.4 \text{ kHz}$, to znamená extrakce módů až do 9 kHz.

Vlastní frekvence tratě bez tlumení lze vypočítat pomocí VPS – PSM řešiče, kde pružiny reprezentující podložky se zavedou až při výpočtu odezvy na silové buzení v softwaru VA One. Jednotlivé módy budou obsahovat volné kmitání kolejnice a volné kmitání pražců bez tlumení. Tlumení a modální vazba mezi pražcem a kolejnicí se zavede až při výpočtu odezvy na silové buzení ve VA One. Tento přístup umožňuje jednoduchou změnu tlumení a tuhosti podložek bez nutnosti přepočtu celé modální analýzy a je ideální na konečné ladění tlumení, tuhosti pružin a celkové odezvy modelu.



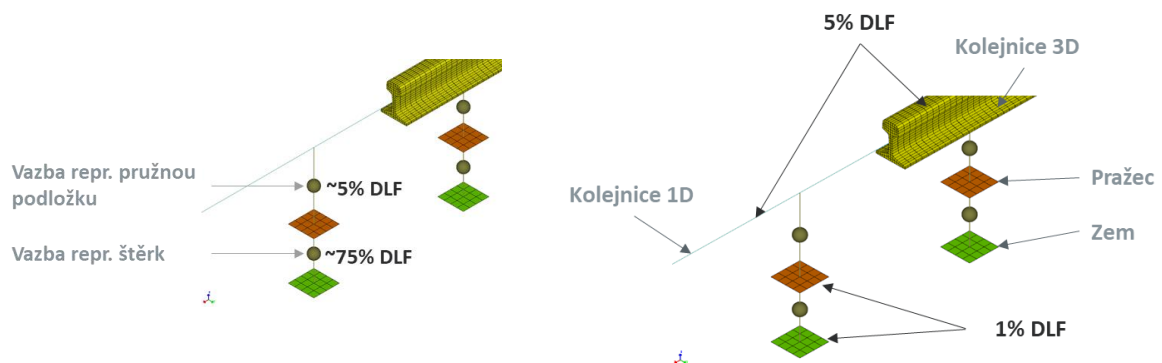
Obr. 14: Nezávislé módy kolejnice (vlevo) a pražců (vpravo)

3.2.3.3 Vynucené kmitání, odezva na silové buzení

Odezva na vynucené kmitání tratě od silového buzení se provede v softwaru VA One, kde se do modelu přidá reálné tlumení jednotlivých komponent včetně modální vazby mezi pražcem a kolejnicí. Odezva na vynucené kmitání se použije na určení vyzářeného akustického výkonu, což poslouží dále jako Acoustic Transfer Function (ATF).

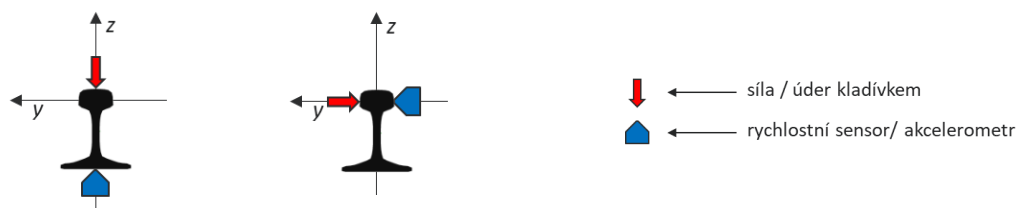
Modální vazba mezi pražcem a kolejnicí se provede pomocí FE Point Junction, pro každý pražec zvlášť. Každému takovému napojení je nutné předepsat ještě tuhost a tlumení tak, jak je znázorněno na Obr. 12 a Obr. 15.

Dále je třeba definovat útlum (*DLF* – Damping Loss Factor) samotné kolejnice, který se volí jako 5% útlum v celém frekvenčním pásmu. Pro ostatní komponenty (zem a pražec) se použije 1 % *DLF*.



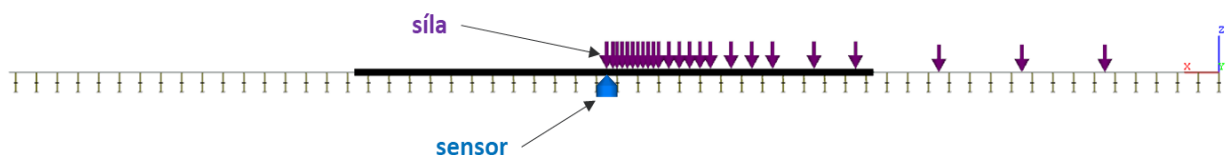
Obr. 15: Definování jednotlivých útlumů *DLF*

Model je řešen ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 6.3 kHz s 10 Hz krokem. Na kolejnici se umístí sensor ve vertikálním a horizontálním směru tak, jak je znázorněno na Obr. 15. Síla se aplikuje vždy proti sensoru, stejně jako při reálném měření.



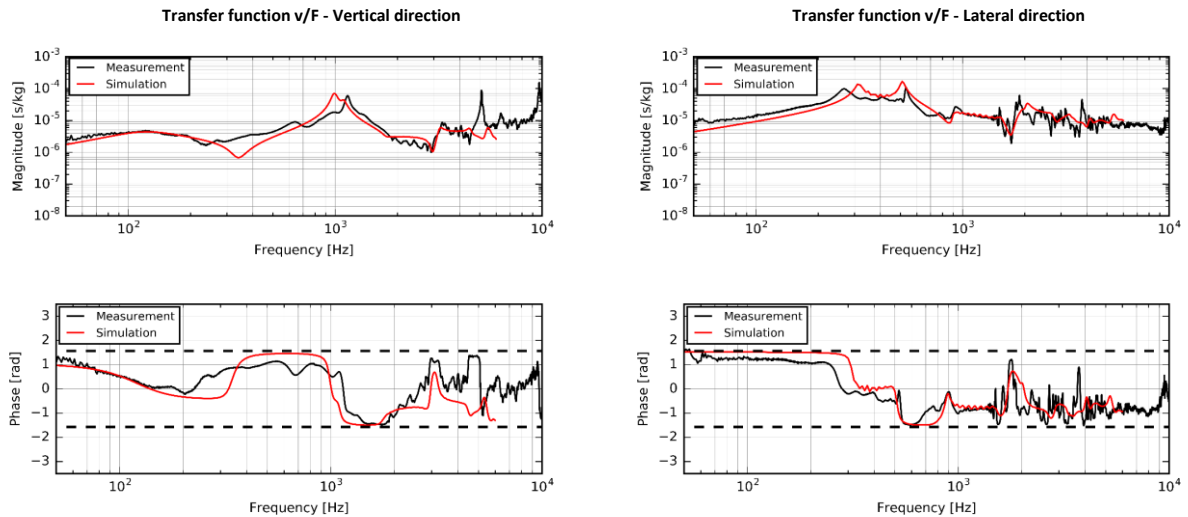
Obr. 16: Pozice sil a sensorů pro vertikální a laterální mobilitu

Pro extrakci přenosových funkcí se už jen mění pozice síly tak, jak je znázorněno na Obr. 16. Zde se vychází z postupu popsáném v normě ČSN EN 15461+A1 (736340) [4] tak, aby se výsledky simulace daly přímo porovnávat s měřeními.



Obr. 17: Příklad rozmístění budících míst na modelu dle normy ČSN EN 15461+A1 [4]

Výsledky simulace v porovnání s měřeními by mohly vypadat jako na Obr. 17. Lze porovnávat jak amplitudu, tak i fázi. Pokud jsou výsledky v dobré shodě, numerický model lze považovat za validovaný a může se dále použít pro potřeby analýzy vyzařování hluku.



Obr. 18: Porovnání měření (černá) a simulace (červená) a) ve vertikálním směru b) v horizontálním směru

Výsledky mobility (zatěžování ve středu kolejnice) je nutné uložit do .txt souboru pro vertikální i horizontální směr tak, jak je znázorněno na Obr. 18. Textový soubor je vstupem pro výpočet hluku vznikajícího při valení kola po kolejnici pomocí nástroje Wheel-Rail Noise module [2].

	\$	Freq	real part	imag part
1				
2	10	1.61821E-07	2.85681E-07	
3	20	3.32676E-07	5.73154E-07	
4	30	5.22535E-07	8.63542E-07	
5	40	7.43299E-07	1.15629E-06	
6	50	1.00967E-06	1.44739E-06	
7	60	1.33953E-06	1.72621E-06	
8	70	1.75228E-06	1.97011E-06	
9	80	2.26163E-06	2.13755E-06	
10	90	2.85790E-06	2.16487E-06	
11	100	3.48083E-06	1.98277E-06	
12	110	4.01105E-06	1.56771E-06	

↓

1 column: Frequency
2 column: Real Part of Mobility
3 column: Imaginary Part of Mobility

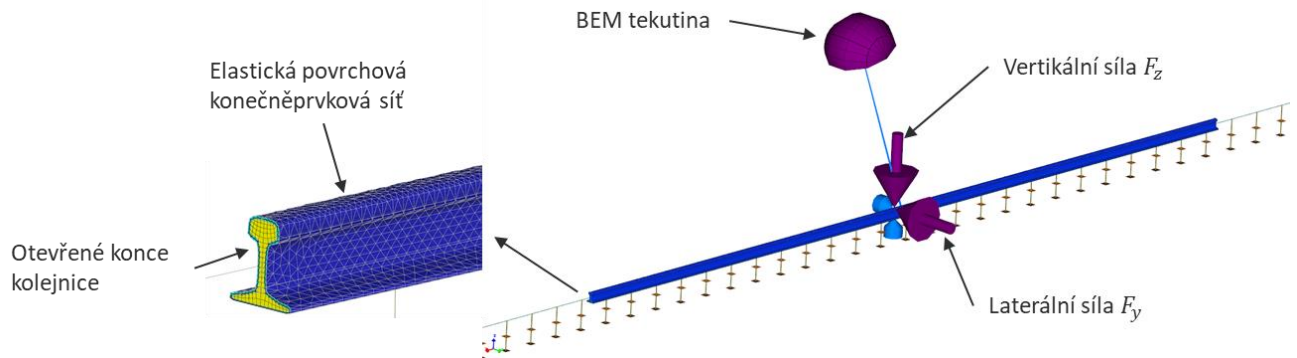
Obr. 19: Formát uložení mobility v textovém souboru, vstup do Wheel-Rail Noise module

3.2.3.4 Vyzařování kolejnice

Model pro vyzařování hluku se vytvoří na základě modelu pro vynucené kmitání z předchozí kapitoly úpravou pro analýzu na základě metody hraničních prvků (Boundary Element Method, *BEM*). Objemové prvky kolejnice se obalí povrchovou FE sítí - akustickými elementy, které reprezentují vyzařování do okolního prostoru. Cílem simulace je získat Akustickou Přenosovou Funkci (Acoustic Transfer Function, *ATF*), která vyjadřuje závislost mezi vyzářeným výkonem P_{rad} [W] při zatížení jednotkovou silou F o amplitudě $1 N$.

Na části kolejnice modelované 3D solidovými prvky se vytvoří povrchová FE síť, která vymezuje rozhraní BEM (ve VA One BEM Fluid) obklopující kolejnici. Oba konce 3D kolejnice se

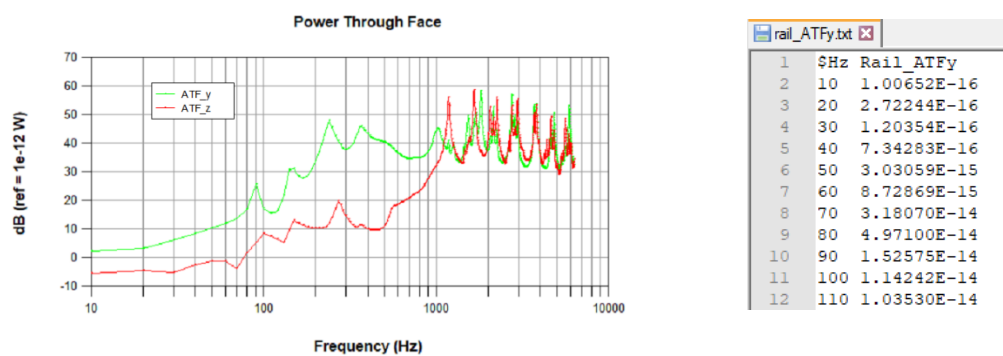
nechají otevřené (bez sítě průřezů). Velikost akustických prvků sítě vychází z akustické vlnové délky λ při F_{max} (6.3kHz) a délka hrany l se určí vztahem $l = \lambda/6$.



Obr. 20: FEM-BEM model vyzařování kolejnice

Model se vyhodnotí pro dvě zatížení:

- kolejnice zatížena laterálně (F_y) → výsledek ATF_y
- kolejnice zatížena vertikálně (F_z) → výsledek ATF_z
-



Obr. 21: Příklad akustické přenosové funkce (ATF_y) pro kolejnici

Výsledky ATF (zatěžování ve středu kolejnice) je nutné uložit do *.txt* souboru pro vertikální i horizontální směr tak, jak je znázorněno na Obr. 20. Textový soubor je vstupem pro výpočet hluku vznikajícího při valení.

3.3 Krok 2 - Metodický postup pro přípravu numerického modelu železničního kola

Cílem je vytvořit konečněprvkový (FEM) model železničního dvojkolí, který po validaci vůči měření slouží jako základ pro stavbu modelu vyzařování tratě pomocí metody hraničních prvků (BEM). Následně vypočtená vyzářená energie je potřebná pro simulaci hluku průjezdu vlaku [5].

Při modelování se vychází z výkresové dokumentace průřezu dvojkolí nebo CAD modelu. Model je zjednodušen na samotné dvojkolí a hmotu reprezentující odpovídající zatížení jedné nápravy.

Při identifikaci vlastních tvarů kmitu může být také uvažován vliv odstředivých sil na posun vlastních tvarů v závislosti na rychlosti vlaku. Nicméně vliv rotace je velmi malý a není ho nutné při modelování zohledňovat.

3.3.1 Měření železničního dvojkolí

Cílem měření je získat soubory dynamických odezev kola na vybuzení impulsním kladívkem a vyzařovacích charakteristik kola. Odezvy budou dále použity pro validaci numerického modelu kola / dvojkolí. Je třeba provést měření:

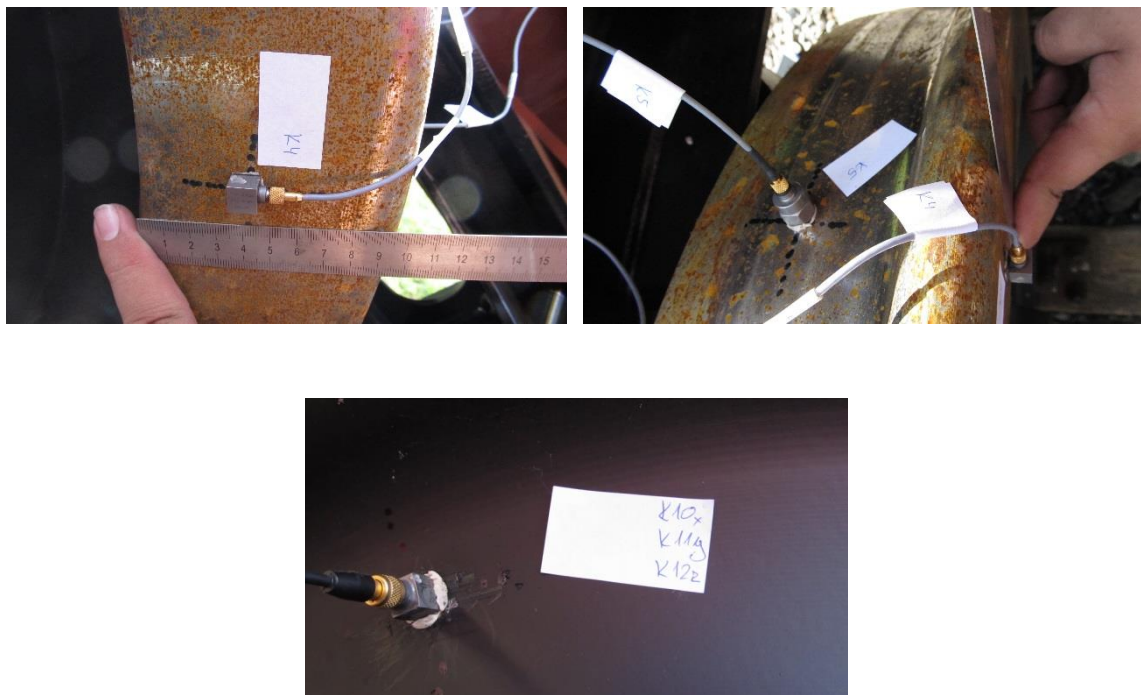
- odezvy kola na buzení impulsem,
- vyzařovací charakteristiky disku kola při buzení bílým šumem,
- vyzařování akustické energie z kola a kolejnice při jízdě různými rychlostmi,
- doprovodná měření.

3.3.1.1 Měření odezvy kola na buzení impulsem

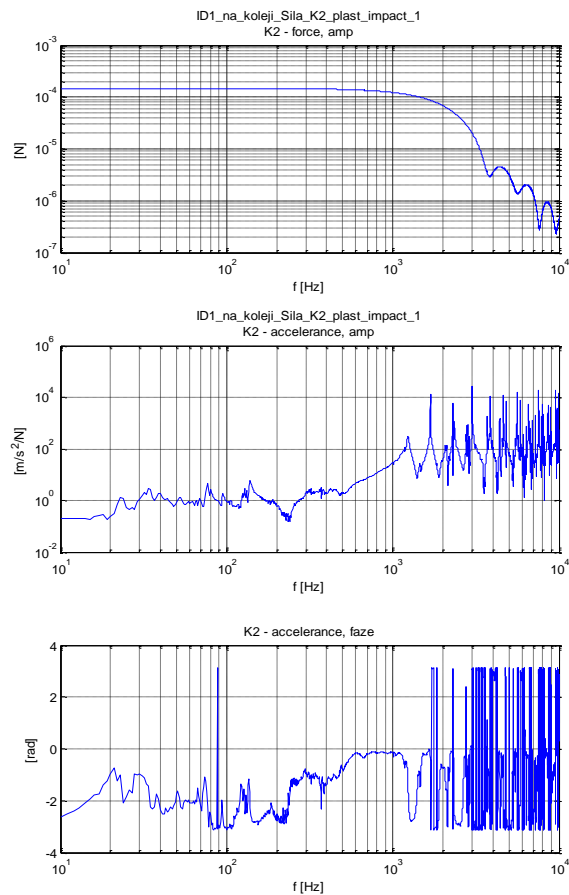
Cílem měření je získat modální vlastnosti kola či dvojkolí na reálném vozu.

Měření se provádí na dvojkolí namontovaném na vozu. Jde o zatížené dvojkolí – stojící prázdný vůz na kolejnici (snadněji proveditelný experiment). V tomto zátěžovém stavu je dvojkolí zatíženo příslušnou vahou vozu.

Na základě provedených numerických simulací pomocného modelu kola, se reálné kolo polepí zvoleným počtem snímačů zrychlení. Buzení se standardně provádí impulsním kladívkem, kdy se poklepání provádí vždy co nejbližší u snímačů, viz Obr. 22.



Obr. 22: Ukázka poloh snímačů zrychlení



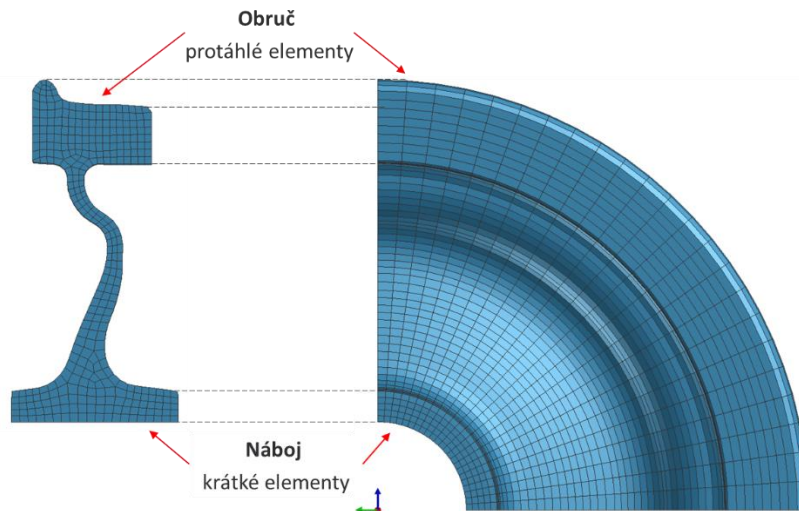
Obr. 23: Ukázka vyhodnocení

Systémem se zaznamenají synchronně všechny odezvy snímačů a vyvinutá síla kladívkem. Ze signálů se spočtou frekvenční spektra a přenosové funkce, viz Obr. 23, zohledňující místa buzení a polohy snímače.

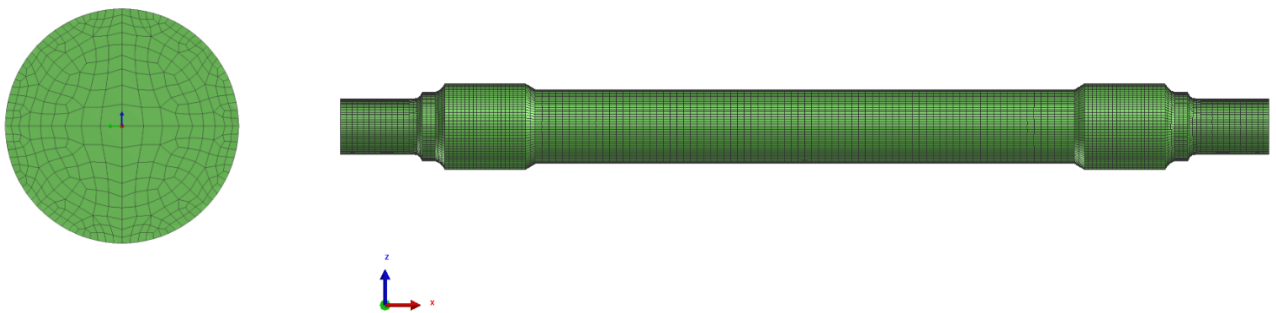
3.3.2 FEM model železničního dvojkolí

Na určení vyzářeného akustického výkonu ze železničního dvojkolí je postup podobný jako u modelování tratě.

FEM model dvojkolí obsahuje pouze objemové prvky, jejichž velikost je volena tak, aby poměr stran elementu nebyl větší než 1:3. Model musí obsahovat obě kola i nápravu, protože zatížení v místě kontaktu není osově symetrické.



Obr. 24: Konečno-prvková síť železničního kola

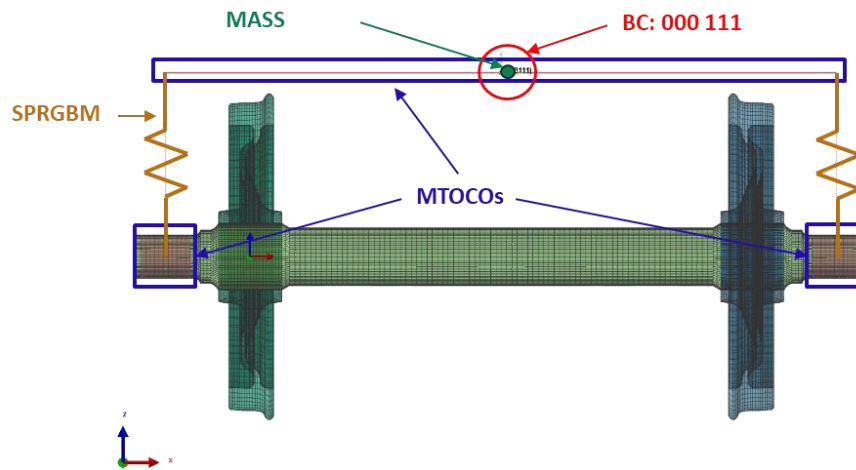


Obr. 25: Konečno-prvková síť nápravy

3.3.2.1 Okrajové podmínky

Odpružení, napojení čepu nápravy s hmotou vozu je nutné aproximovat pomocí pružinových prvků, kterým lze definovat tuhosti ve směrech všech os. Každý typ vozu má své specifické odpružení a je třeba tyto parametry získat od výrobce.

U modelu dvojkolí je nutné nastavit správně stupně volnosti. Uvažujme, že náprava je volně uložena na kolejnici, tzn. náprava může volně kmitat ve vertikálním směru. Do modelu je důležité zahrnout její pružné uložení a hmotnost vozu připadající na jednu nápravu. Hmotnost vozu lze modelovat jako soustředěnou hmotu (v PAM-Crash: MASS) aplikovanou na COG uzel tuhého tělesa reprezentujícího strukturu vozu. Není nutné modelovat kontakt s kolejnicí.



Obr. 26: Okrajové podmínky

Okrajové podmínky lze označit $T_x T_y T_z R_x R_y R_z$, kde T značí posuvy (translace) a R rotace. Hodnota 1 označuje odebraný a 0 ponechaný stupeň volnosti.

Jak je znázorněno na Obr. 26 v modelu se odeberou pouze rotace tuhého tělesa reprezentujícího strukturu vozu (000 111). Jiných okrajových podmínek není třeba.

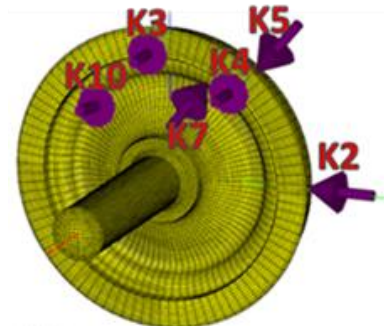
3.3.2.2 Modální analýza

Pro výpočet odezvy dvojkolí na silové buzení je nutné nejprve vypočítat vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu minimálně pro 1.4-násobek cílové frekvence. Pro následné numerické simulace bude postačovat $F_{max} = 6.4 \text{ kHz}$, tzn. extrakce módů je třeba provést až do 9kHz.

Vlastní frekvence dvojkolí bez tlumení lze vypočítat pomocí VPS – PSM řešiče, kdy se použije model sestavený v minulé kapitole [3.2].

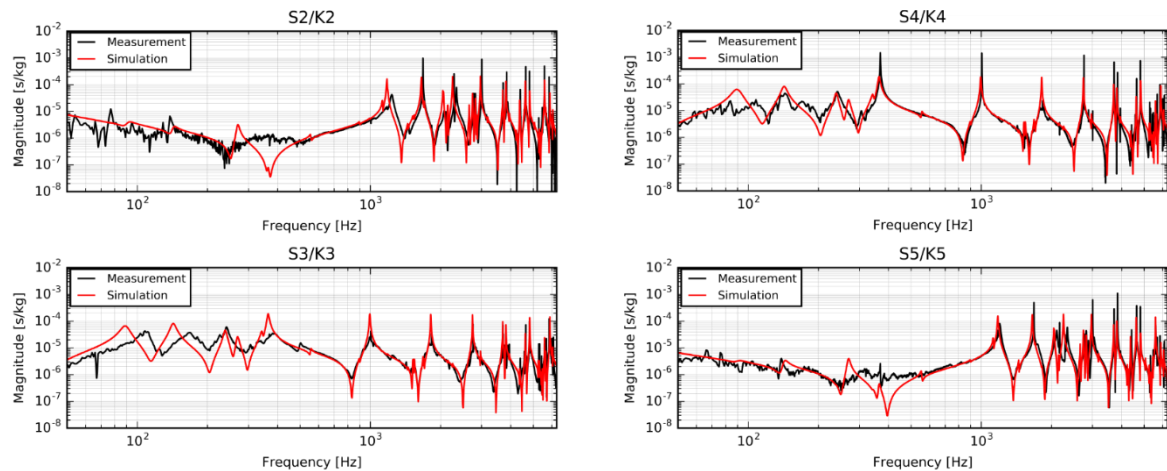
Pro validaci odezvy kola na buzení je nutné zvolit budící pozice a provést měření, viz kapitola [3.3.1.1]. Pozice se volí na základě simulací tak, aby buzení v nich umístěné vyvolalo co největší počet módů.

Do VA One se importuje geometrie a modální báze z VPS. Postupně se pro každou sílu a příslušný snímač vypočte mobilita (v/F), viz kapitola [3.1.1.1].



Obr. 27: Příklad volby pozic pro zatížení v měření (poklep) a v simulaci (síla) mobility

Pro validaci modelu je nezbytné, aby se spektra mobilit shodovala ve frekvencích i úrovních špiček tak, jak je znázorněno na Obr. 28, kde je porovnána simulovaná a změřená odezva.



Obr. 28: Porovnání simulace (červená) a měření (černá) - mobility v různých pozicích

Výsledky mobility pro kolo je nutné uložit do .txt souboru pro vertikální i laterální směr tak, jak je znázorněno na Obr. 29. Textový soubor je vstupem pro výpočet hluku vznikajícího při valení.

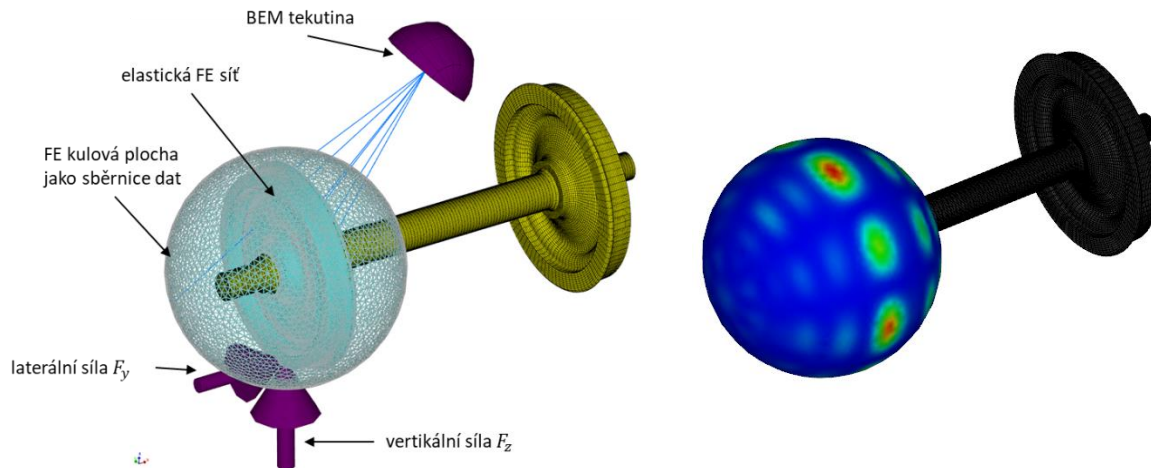
1	\$ Hz	Sensor / Rail_Force	- rea
2	10	3.31303E-07	-4.49555E-05
3	20	1.25513E-07	-1.64580E-05
4	30	4.50689E-08	-1.04888E-05
5	40	3.32478E-08	-7.68069E-06
6	50	3.55931E-08	-6.01018E-06
7	60	4.69133E-08	-4.87508E-06
8	70	7.80592E-08	-4.01341E-06
9	80	2.23625E-07	-3.24100E-06
10	90	8.96305E-07	-3.37618E-06
11	100	1.75207E-07	-3.04090E-06
12	110	1.07793E-07	-2.55711E-06

- ↓
- 1 column: Frequency
 - 2 column: Real Part of Mobility
 - 3 column: Imaginary Part of Mobility

Obr. 29: Formát uložení mobility v textovém souboru, vstup do Wheel-Rail Interface

3.3.2.3 Vyzařování kola

Posledním krokem je vytvoření modelu vyzařování hluku, kdy se model pro vynucené kmitání z předchozí kapitoly, rozšíří o hraniční elementy (Boundary Element Method, BEM). Cílem simulace je získat akustickou přenosovou funkci (Acoustic Transfer Function, ATF), která vyjadřuje závislost mezi vyzářeným výkonem $P_{rad}[W]$ při zatížení jednotkovou silou F o amplitudě $1 N$, stejně jako pro kolejnici.

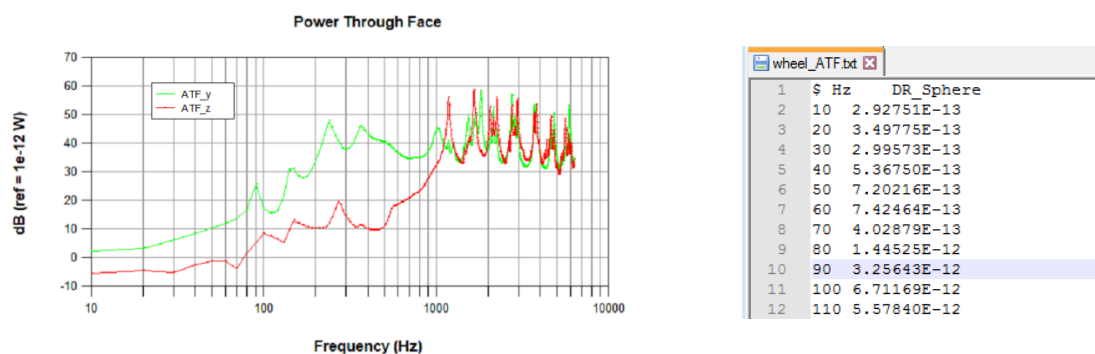


Obr. 30: BEM model pro modelování vyzařování dvojkolí

V modelu se uvažuje vyzařování pouze z jednoho kola, kde elastická síť akustických elementů pokryje pouze jedno kolo, jak je znázorněno na Obr. 30.

Model se vypočte pro dvě zatížení:

- Kolo zatížené laterálně (F_y) → výsledek ATF_y
- Kolo zatížené vertikálně (F_z) → výsledek ATF_z



Obr. 31: Příklad akustické přenosové funkce (ATF_y) pro kolo

Výsledky ATF je nutné uložit do *.txt* souboru pro vertikální i horizontální směr tak, jak je znázorněno na obrázku. Textový soubor je vstupem pro výpočet hluku vznikajícího při valení.

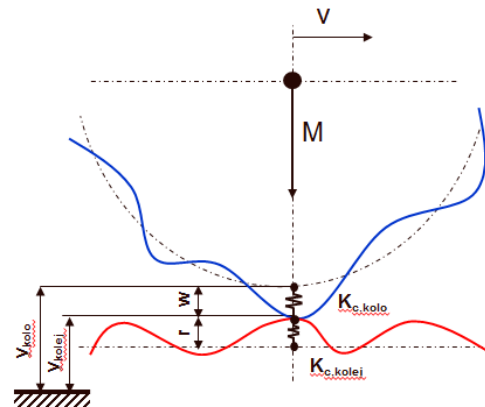
3.4 Krok 3 - Výpočet vyzářeného výkonu od interakce kola s kolejnici

Posledním krokem v modelování interakce kola a kolejnice je dosažení všech dílčích informací do matematického modelu, který vychází z předpokladu, že hluk při valení vzniká z důvodu valení dvou drsných povrchů po sobě. Hluk je definován jako funkce drsnosti povrchu, lokální tuhosti v kontaktním místě a filtru vlnových délek a může být popsán rovnicí:

$$P_{ai} = H_{pi} |\bar{K}|^2 |T|^2 (S_{\Delta w}) \quad (6)$$

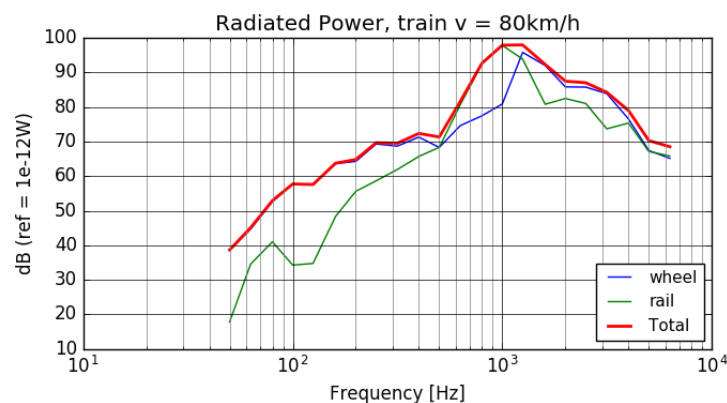
kde jednotlivé veličiny jsou:

- $P_{ai} [W]$ - vyzářený akustický výkon,
- $H_{pi} n [W/N]$ - jednotkový vyzářený výkon,
- $K [N/m]$ - tuhost kontaktu, kola a kolejnice,
- $T [-]$ - frekvenční/prostorový filtr,
- $S_{Dw} [m^2]$ - drsnost povrchů.



Obr. 32: Model kontaktu kola s kolejnicí

Výsledkem nástroje Wheel-Rail Noise modulu je celkový vyzářený výkon.



Obr. 33: Příklad výstupu z nástroje – Celkový vyzářený výkon

Křivka výkonu popisuje akustický výkon, který je vyzářen při interakci jednoho kola s kolejnicí při dané rychlosti. Při modelování průjezdu vlaku se každé kolo nahradí kompaktním zdrojem, kde síla zdroje bude definována křivkou akustického výkonu.

3.5 Metodický postup pro tvorbu modelu průjezdu

Pro výpočet průjezdu vlaku, kvůli rozměrům modelu vlaku, je nejvhodnější použít numerickou metodu Raytracing, viz [10]. Tato metoda je založena na sledování paprsku a je vhodná na zjednodušený popis hlukového pole v exteriéru.

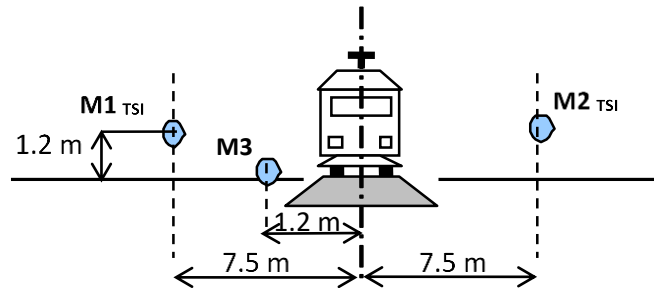
Validace numerického modelu může být provedena za pomoci měření vnějšího hluku průjezdu a hluku v podvozkové části vozu, viz článek [6].

3.5.1 Měření vnějšího hluku při průjezdu

Měření vnějšího hluku při průjezdu se provádí na trati, která splňuje požadavky TSI NOI, jak je popsáno v normě ČSN EN ISO 3095 [1], podle které se celé měření provádí.

3.5.1.1 Stanoviště měření a umístění mikrofonu

Stanoviště měření by mělo být umístěno ve volném zvukovém poli. Podle ČSN EN ISO 3095 se umísťují dva mikrofony. Třetí mikrofon se umístí vodorovně kolmo ke koleji ve vzdálenosti 1.2 m od podélné osy koleje ve výšce hlavy kolejnice, viz Obr. 34 a Obr. 35.



Obr. 34: Poloha mikrofonů na stanovišti měření v místech označených $M1_{TSI}$, $M2_{TSI}$ a $M3$



Obr. 35: Umístění mikrofonů na stacionárním stanovišti – vnější hluk

3.5.1.2 Měření vyzařování akustické energie z kola a kolejnice

Cílem měření je zjištění frekvenčního spektra vyzařovaného akustického tlaku kola a trati a celkové hladiny akustického tlaku. Měření by mělo být provedeno na železničních nákladních vozech kontejnerového typu. Vozy tohoto typu nejméně ovlivní vyzařovaný hluk od kola a trati vyzařovaným hlukem skříně vozu oproti jiným typům nákladních vozů.

Měly by být provedeny dva typy měření hluku:

- **vnitřní** - pět mikrofonů umístěno v prostoru podvozku, viz Obr. 36
- **vnější** - tři mikrofony umístěny na stacionárním stanovišti, viz Obr. 35.

Měření vnějšího hluku se provádí v souladu s normou ČSN EN ISO 3095. Zkušební souprava by měla být sestavena jako při zkouškách průjezdu vozidla kolem stanoviště podle ČSN EN ISO 3095 [1].

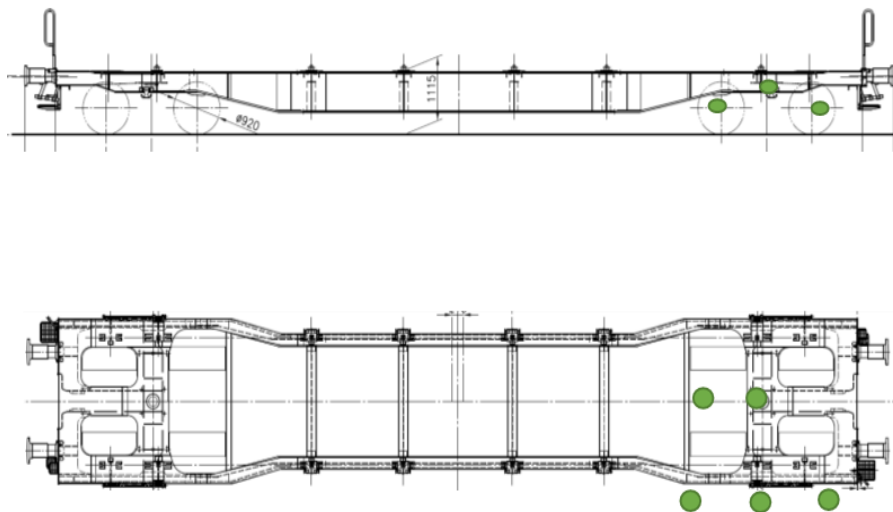


Obr. 36: Umístění mikrofونů na podvozku – vnitřní hluk

3.5.1.3 Měření vnitřního hluku na vozidle

Vyzařovaný hluk na vozidle by měl být měřen při jízdě zkušební soupravy po celé délce vybraného úseku, který splňuje podmínky TSI-NOI na drsnost povrchu kolejnice a stupně dynamického útlumu.

Mikrofony by měly být umístěny podle Obr. 37.



Obr. 37: Umístění mikrofونů v podvozku

3.5.1.4 Stanovení intervalu vyhodnocení

Stanovení intervalu vyhodnocení T_p je odlišné pro vozy a pro podvozky.

- Zkoušené vozy
 - Interval vyhodnocení $T_p^{celý vůz}$ [ms] podle TSI-NOI začíná v okamžiku, kdy před místem mikrofону projíždí střed prvního zkoušeného vozu a končí v okamžiku, kdy před místem mikrofону projíždí střed druhého zkoušeného vozu.
- Podvozky

- Interval vyhodnocení $T_p^{podvozek}$ [ms] je stanoven od okamžiku, kdy před místem osy mikrofonu projíždí začátek zkoušeného podvozku a končí v okamžiku, kdy před místem mikrofonu projíždí konec stejného podvozku.

Jmenovité časové intervaly měření T_p pro celý vůz i podvozek jsou definovány pomocí délky zkoušeného vozu přes nárazníky, respektive délky podvozku a stanovené rychlosti jízdy vztahem:

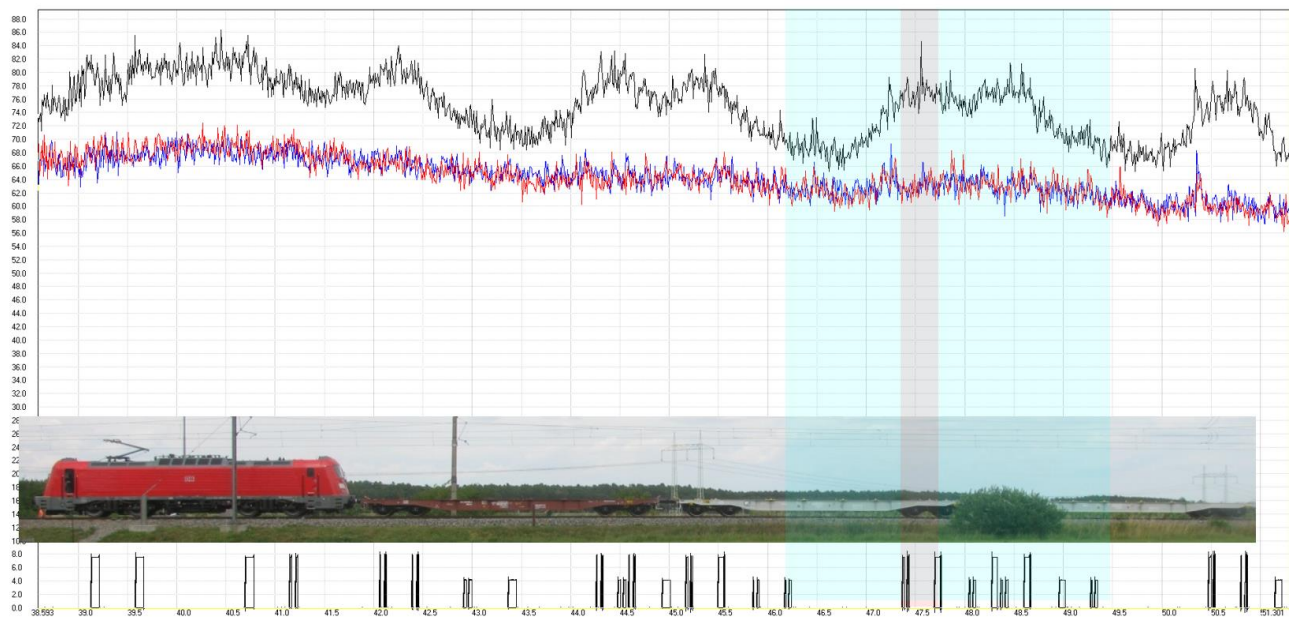
$$T_p = 1000 \frac{3,6 l}{v}, \quad (7)$$

kde:

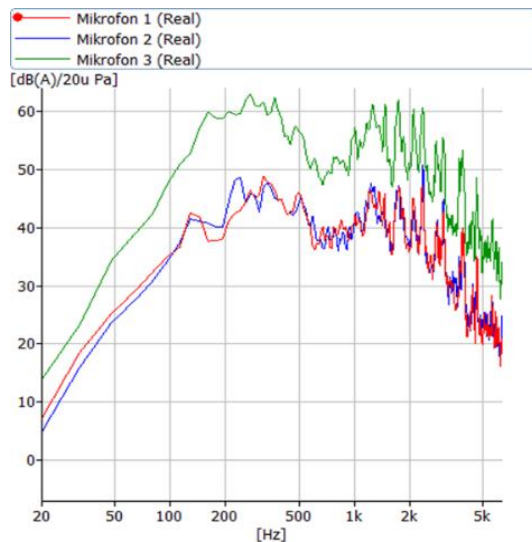
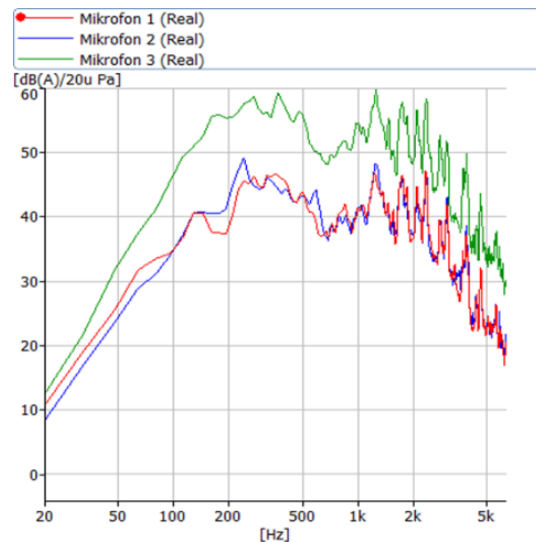
- T_p [ms] - časový interval pro vyhodnocení hladiny hluku při průjezdu,
- l [m] - délka zkoušeného vozu / podvozku (17,24 m pro vůz, 1,8 m pro podvozek),
- v [km/h] - rychlost zkoušeného vozu při průjezdu měřicím stanovištěm.

Skutečný interval vyhodnocení T_p by měl být stanoven např. na základě časových poloh impulsů indikujících průjezdy kol.

3.5.1.5 Ukázka naměřených hodnot



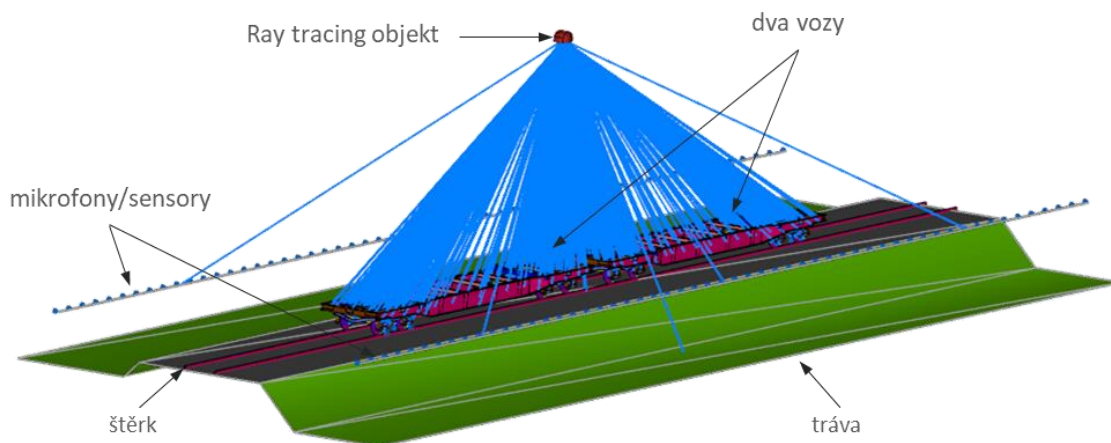
Obr. 38: Časový záznam průjezdu vlaku

Obr. 39: T_p podvozkuObr. 40: T_p celého vozu

3.5.2 Model průjezdu vlaku s podvozky

Pro modelování průjezdu vlaku bude uvažováno podloží, geometrie vozů a vyzařování hluku od interakce kola s kolejnicí. Uvažuje se pouze difrakce kolem geometrie a vyzařování vozu samotného bude zanedbáno.

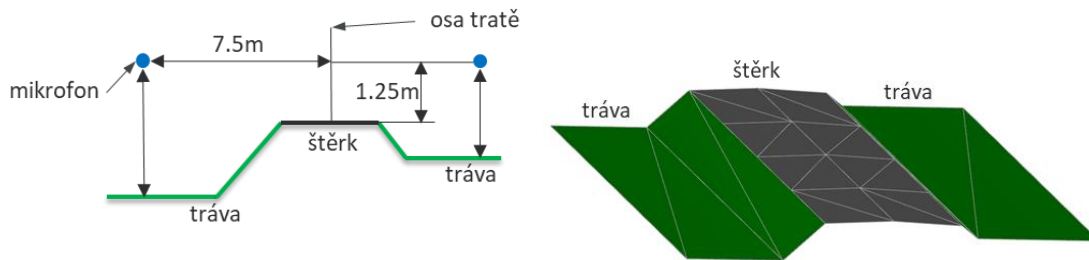
Pro reprezentaci vyzařování odvalujícího se kola a náležícího úseku kolejnice se použije všesměrový zdroj 'monopól' nebo ve VA One zdroj Compact Acoustic Source (CAS). Zdroje jsou umístěny ve středech všech kol modelované soupravy.



Obr. 41: Raytracing model

Tento typ zdroje lze použít jako všesměrový nebo s frekvenčně závislou směrovou charakteristikou vyzařování. V našem případě se uvažuje směrovost kola a jako spektrum výkonu se použije vypočtený výkon z interakce kolo-kolejnice. Směrovost zdroje se získá z modelu vyzařování kola (BEM model) z konečno-prvkové kulové sítě, která se exportuje jako *.hdf5* soubor.

Reálné tratě obsahují komplexní geometrii okolního terénu. Trať může být na náspu, či v rovině s okolím. Také nemusí být symetrická, jak bylo voleno v našem případě.



Obr. 42: Uvažovaný průřez tratě

Velmi důležitý faktor jsou materiály tvořící trať a její okolí, kdy jde nejčastěji o štěrk a trávu. Úrovně hluku v mikrofonech jsou složeny z přímé a odražené složky, která je samozřejmě zásadně ovlivněna geometrií okolí a absorpcí povrchů. Absorpce tratě (povrchů) se ve VA One definuje pomocí impedance (Area Isolator), tzn. frekvenčně závislá komplexní hodnota impedance povrchu. Vztah mezi impedancí a absorpcí je definovaný vztahem

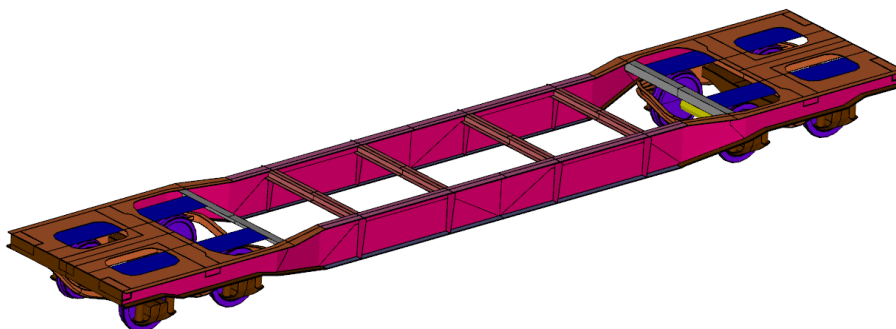
$$\alpha = 1 - \frac{(Z - Z_a)^2}{(Z + Z_a)^2}, \quad (8)$$

kde Z_a je charakteristická impedance vzduchu definovaná jako

$$Z_a = \rho c, \quad (9)$$

kde ρ je hustota vzduchu a c je rychlost zvuku ve vzduchu, a Z je impedance testovaného povrchu. Hodnoty absorpce povrchu je nutné určit pomocí měření [9] nebo identifikovat tak, jak je popsáno v [1].

Geometrie vozů je definována pomocí (SEA) panelů, kde jednotlivé panely na sebe navazují uzel na uzel. (SEA) panely slouží jako geometrický popis odrazivých ploch pro Raytracing, zde je tloušťka panelů ignorována.



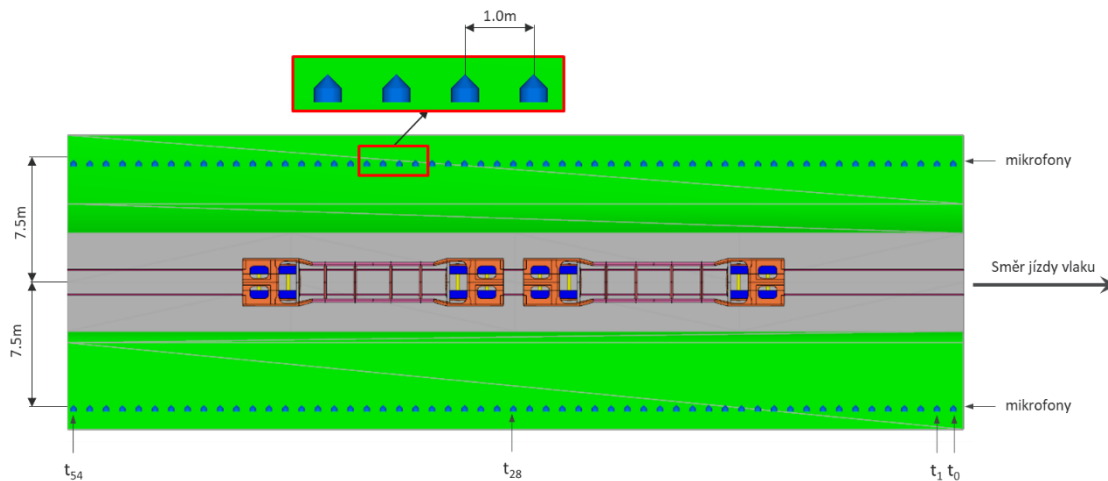
Obr. 43: Geometrická reprezentace železničního vozu pro Raytracing

Všechny plochy struktury se uvažují dokonale odrazivé, tzn. nebude zde uvažována žádná absorpce.

3.5.3 Virtuální mikrofony pro popis průjezdu

Při reálném měření je zapotřebí pouze dvou mikrofonů, na levé i pravé straně jeden. Ve virtuálním modelu se pohyb modeluje pomocí sady mikrofonů (sensorů) tak, jak je znázorněno na Obr. 43. Poloha sensorů je identická s mikrofony průjezdu dle normy ČSN EN ISO 3095 [1], kdy virtuální mikrofony jsou rozmístěny ve výšce 1.2 m a vzdálenosti 7.5 m od středu tratě po obou stranách.

Vzdálenost mezi sensory ve směru jízdy může být libovolně zvolena, ale platí: hustější síť sensorů = jemnější rozlišení v časové oblasti. 1.0m mezi sensory plně postačuje na popis hluku při rychlostech mezi 80km – 160km/h. Pro nižší rychlosti < 70km/h je vhodnější volit menší vzdálenosti, např. 0.5m.



Obr. 44: Sensory reprezentující jednotlivé časové okamžiky průjezdu vlaku

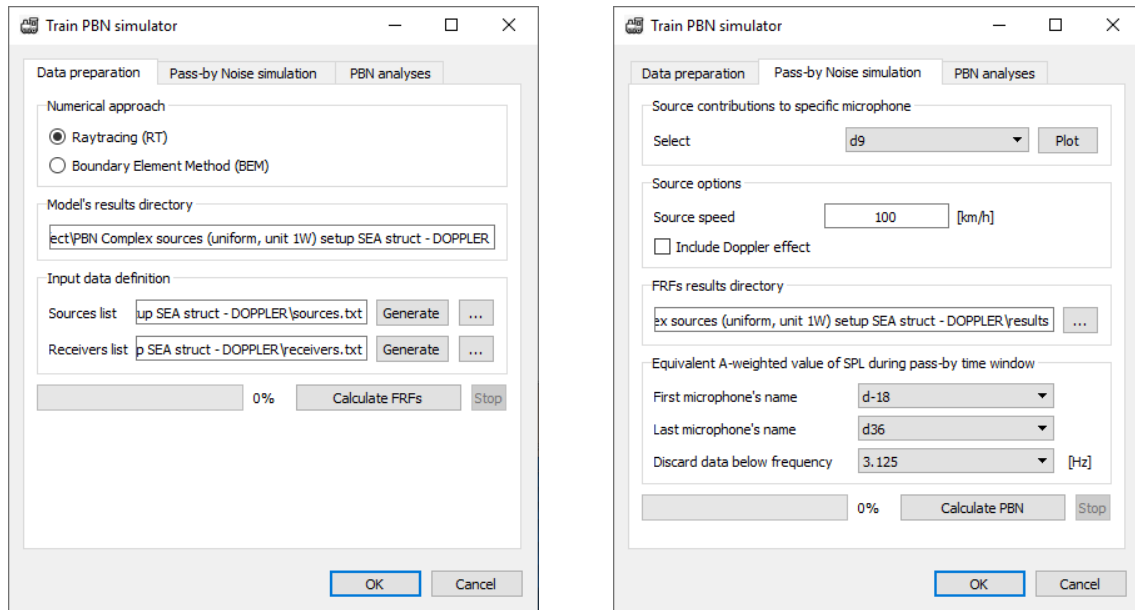
Čas t_0 reprezentuje sensor umístěný nejvíce před vlakem. V čase t_{28} je vlaková souprava v polovině. V čase t_{54} se vlak vzdaluje. Ze souřadnic sensorů lze určit úroveň hluku v daném časovém okamžiku a poskládat tak průjezd vlaku. Pro dokončení definice modelu je nutné přiřadit jednotlivým plochám hodnoty absorpce a přiřadit typ plochy.

Před spuštěním simulace průjezdu je důležité zvolit numerické parametry Raytracingu. Vzhledem k rozměrům a komplexitě modelu, je nutné stanovit dostatečný počet emitovaných paprsků ze zdrojů. To lze provést tak, že se postupně přidává počet emitovaných paprsků až do momentu, kdy všechny mikrofony dostanou takzvaný zásah paprskem. Tento proces se provádí bez zapnuté difrakce.

Při vývoji metodiky bylo zjištěno, že 2 000 000 emitovaných paprsků dostatečně popíše blízké pole v podvozkové části a přitom dojde k zásahu všech mikrofonů ve volném poli. Ostatní numerické parametry jsou uvedeny na Obr. 44. Pro rozměrově podobné úlohy lze použít tyto parametry jako výchozí. Pro mikrofony ve volném poli, sensory použité pro výpočet průjezdu, je doporučeno použít větší poloměr $r = 0.015$ m, což lze provést manuálně pro každý sensor zvlášť.

3.5.4 Výpočet hluku od průjezdu vlaku

Na výpočet hluku průjezdu byl sestaven nástroj PBN Modeler v prostředí VA One.



Obr. 45: Ukázka nástroje Train PBN simulator

V prvním kroku uživatel definuje, které zdroje hluku a které sensory mají být při výpočtu aktivní. Pak uživatel spustí statický výpočet (Raytracing) a vypočítají se přenosové funkce mezi každým zdrojem a každým senzorem. Z každého zdroje je emitováno 2 000 000 paprsků. Úroveň hluku od jednoho zdroje je definován jako komplexní součet všech paprsků, které zasáhly cíl

$$P_{complex}^{source} = \sum_{rays} P_{complex}^{ray} \quad . \quad (10)$$

V druhém kroku uživatel předepíše rychlost soupravy (například 80 km/h). Poté se spustí finální výpočet a sečtou se příspěvky od všech zdrojů dohromady pro každý sensor zvlášť. Hluk pro jeden sensor je pak definován vztahem

$$P_{tot} = \sqrt{\sum_{sources} |P_{complex}^{source}|^2} \quad . \quad (11)$$

Zde lze uvažovat i vliv Dopplerova efektu.

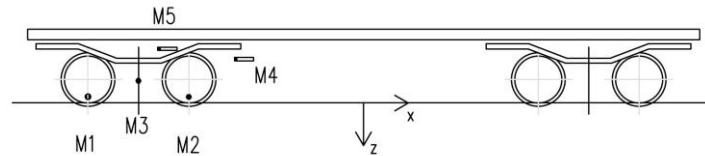
Výsledkem simulace je hluk průjezdu vyjádřený v dB(A) pro zvolenou sadu sensorů. V tomto případě pro určení hluku podvozku $L_{pAeq, Tp}$ se vypočítá průměrná hodnota celkových hodnot hluku v senzorech 0 až 18, od středu jednoho vozu ke středu druhého vozu (znázorněno červeně dole na Obr. 46).



Obr. 46: Ukázka volby sensorů pro průměr

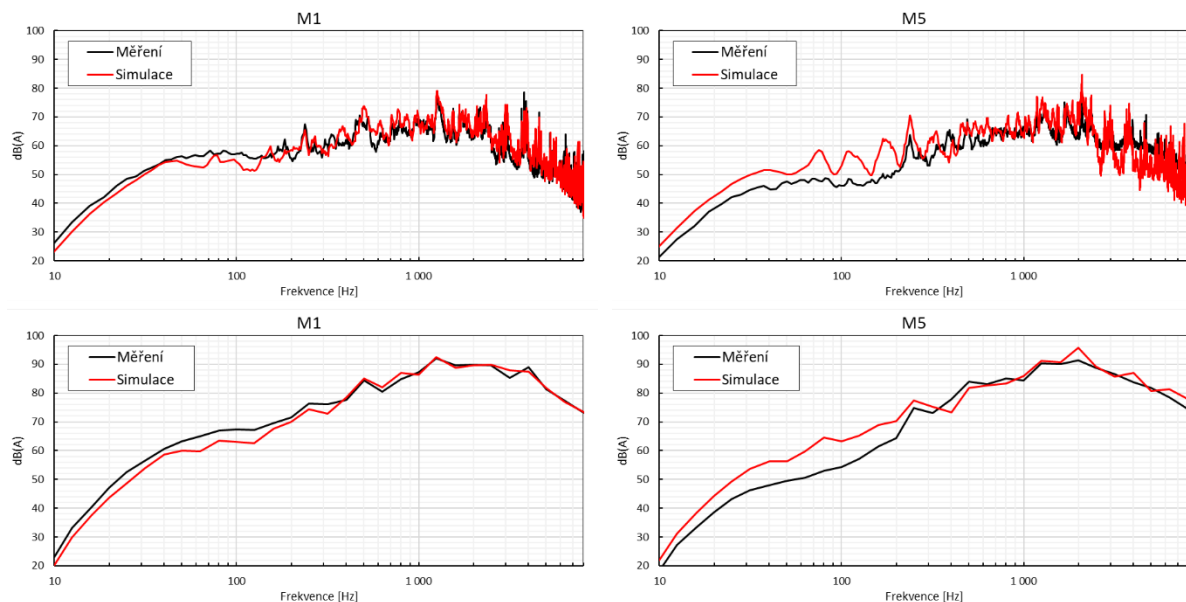
3.5.5 Validace modelu a porovnání výsledků simulace s měřením

Pro ověření přesnosti metodiky byly všesměrové zdroje (kola) nalaďeny tak, aby hluk v podvozku modelu (mikrofony M1-M5) reprezentoval hluk z měření průjezdu sestavy.



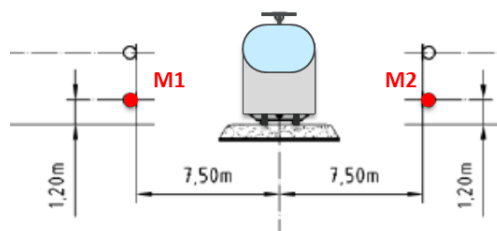
Obr. 47: Umístění mikrofonů a senzorů v oblasti podvozku

Jak je znázorněno na Obr. 48 bylo dosaženo přijatelné shody mezi měřením a simulací v oblasti podvozku. Zde lze předpokládat že akustický výkon zdrojů je dostatečný a počet použitých paprsků (rays) vygeneruje dokonalé odrazivé pole.



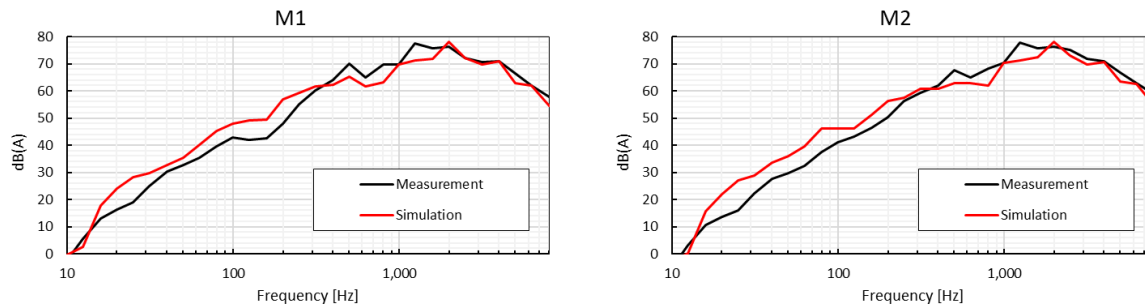
Obr. 48: Porovnání spekter hluku v podvozku

Po dosažení přijatelné shody v prostoru podvozku lze přistoupit k porovnání hluku v mikrofonech určených pro simulaci průjezdu viz Obr. 49.



Obr. 49: Umístění mikrofonů pro simulaci průjezdu

Jak je znázorněno na **Error! Reference source not found.**, i zde jsou spektra hluku v přijatelné shodě s měřením. Jak již bylo popsáno v kapitole [3.5] na výpočet je použita metoda Raytracing, která má své omezení v nízkých frekvencích, v tomto případě mezi 0 – 200 Hz. Proto je nutné přistupovat k výsledkům pod 200 Hz s obezřetností (omezení metody). Ve většině případů je na spektra hluku aplikován filtr typu A, který potlačuje úrovně hluku v těchto frekvencích o několik desítek dB.



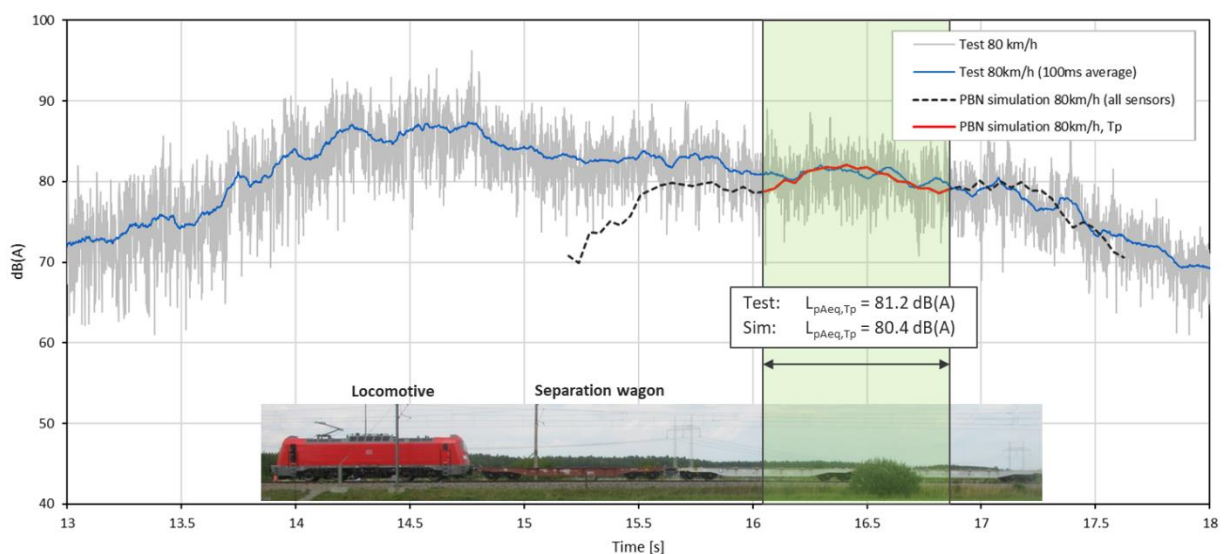
Obr. 50: Porovnání spekter hluku průjezdu při 80 km/h

Posledním krokem při určení hluku průjezdu je sestavení časového průběhu z jednotlivých sensorů rozmístěných podél virtuální trati, viz Obr. 44. Pro každý sensor je vypočítaná celková hladina hluku O.L. (Overall Level), která je definovaná jako odmocnina ze sumy čtverců tlaků v celém frekvenčním pásmu:

$$O.L._i = \sqrt{\sum_n S_n^2} \quad (12)$$

kde i je pozice sensoru, S_n je hodnota tlaku při specifické frekvenci.

Zobrazení a vyhodnocení průjezdu vlaku je zpracováno automaticky nástrojem (Train PBN simulator), viz [3.5.4]. Výsledky simulace a porovnání s měřením jsou zobrazeny na Obr. 51.



Obr. 51: Porovnání celkového hluku průjezdu při 80 km/h

4 Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Metodický postup stavby 3D matematických modelů pro simulaci hluku při průjezdu vlaku nebyl v rámci České Republiky doposud zpracován se zohledněním detailní geometrie podvozku, vozů a tratě.

U kolejových vozidel se v technické praxi používá pro výpočet hluku od interakce kola s kolejnicí nástroj TWINS. Ten za pomoci 1D analytického přístupu zjednodušuje problematiku na systém kmitajících hmot a vypočte spektrum akustického výkonu. Následně se zjištěný výkon použije při určení spekter hluku u pozorovatele. Pro určení hluku průjezdu je nutné převést spektra hluku do časové oblasti a stanovit ekvivalentní úroveň hluku průjezdu. Zde je důležitá geometrie vozu způsobující difrakce a komplexní odrazy, ta není u TWINSu zohledněna.

Ve většině případů hluk vzniklý od interakce kola s kolejnicí může výrobce vozů ovlivnit pouze návrhem tiššího dvojkolí a komplexnější geometrie tlumících členů, kde už je 1D popis nedostatečný.

Další předností postupu oproti ostatním je začlenění vzniklého modulu do stávajícího rozsáhlého akustického softwaru. Pro akustické studie celého vozidla lze proto využít jen jeden ucelený software (VA One).

Zohlednění 3D geometrie jak při návrhu dvojkolí, tak při výpočtu šíření hluku, se ukazuje v dané problematice jako klíčový faktor k zpřesnění výpočtů a efektivnějšímu snížení hluku kolejových vozidel. Uvažování vlivu celé 3D geometrie vozu na celkový hluk průjezdu je zcela novým přístupem, který nebyl doposud aplikován kvůli své komplexnosti a výpočtové náročnosti.

Navržená metodika pro simulaci průjezdu popisuje, jak stavět a validovat 3D komplexní vibroakustické modely za pomoci softwaru VA One bez omezení na tvar nebo typ dvojkolí. Metodika je navržena tak, aby bylo možné různě kombinovat vstupní data získaná ze simulací nebo měření ve všech krocích procesu stanovení hluku průjezdu.

5 Popis uplatnění certifikované metodiky

Předložená metodika je určena pro stavbu akustického modelu tratě, kol, přilehlého terénu tratě a případně i celého kolejového vozidla jedoucího po trati konstantní rychlostí. Uplatní se především při návrhu osobních vozů, lokomotiv a jednotek, ale i nákladních vozů, jejichž vyzařovaný hluk nesmí překročit stále se zpřísňující limitní hodnoty.

Vyzařovaný hluk od kol a tratě se bez specializovaného software těžko odhaduje. Tato metodika umožní zpřesnění těchto odhadů a lepší definování limitních hodnot pro ostatní zařízení nacházející na železničním vozidle tak, aby vozidlo splnilo hlukové limity.

Aplikací navržené metodiky lze z pohledu akustického vyzařování odhalit nevhodný návrh geometrie dvojkolí již ve fázi konceptu. Metodika může také pomoci při rozhodování mezi více variantami návrhu hlukových opatření v podvozkové části například výběrem vhodného tlumícího materiálu. Dále je možné metodiku simulace průjezdu rozšířit o další zdroje hluku, jako je hluk od motoru, převodovky nebo elektro výzbroje.

Za pomoci metodiky a vytvořených nástrojů může být vytvořena databáze tratí a různých typů podvozků. Data lze vzájemně kombinovat pro relevantní odhad hluku průjezdu nového vozu již během tvorby nabídek pro národní a nadnárodní tendry a předejít tak komplikacím z nedosažených cílů.

6 Ekonomické aspekty

Řešení hluku kolejových vozidel ve fázi vývoje a náklady spojené s použitím metodiky a výpočtem podstatně snižují riziko dodatečných úprav vozidla nebo jeho částí a opakovaným či dodatečným zkouškám. Tím se dosáhne podstatných úspor, které převýší náklady spojené s aplikací metodiky a výpočtem.

Řešením problematiky průjezdu lze plně virtuálně vyhodnotit více konstrukčních variant a umožňuje vybrat tu nejvhodnější. Při výběrových řízeních jsou požadavky na hluk stále přísnější, a dokonce při některých tendrech jsou vyžadovány numerické simulace jako doklad splnitelnosti požadavků koncového zákazníka.

Metodiku simulace průjezdu lze použít pro vyhodnocení hluku jak pro vozy nákladní dopravy, tak pro tramvaje nebo osobní vozy.

Možnost predikovat vnější hluk ještě neexistujícího vozu se tak může stát velkou konkurenční výhodou.

7 Literatura

- [1] ČSN EN ISO 3095: Akustika – Železniční aplikace – Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly.
- [2] R. Fiedler a Z. Novotný, M_PV_18_049_r01, Wheel-Rail noise module 1.0 – User Guide.
- [3] R. Fiedler a Z. Novotný, „Rail track modelling,“ Mecas ESI s.r.o, 2017.
- [4] ČSN EN 15461+A1: Železniční aplikace – Emise hluku – Charakterizace dynamických vlastností úseků koleje pro měření hluku při průjezdech.
- [5] R. Fiedler a Z. Novotný, „Wheelset modelling,“ Mecas ESI s.r.o., 2017.
- [6] R. Fiedler, L. Phamová, Z. Novotný a M. Calloni, „Measurement and Acoustic Model Validation of a Train Pass-by Noise Using Ray Tracing Method“.INTER-NOISE 2019.
- [7] R. Fiedler a Z. Novotný, „Pass-by Noise Modelling,“ Mecas ESI s.r.o., 2019.
- [8] M. Richter a L. Phamová, „Projekt TRAIN - PBN: Měření hlukově relevantních parametrů: 4 nápravový kontejnerový vůz,“ VUKV a.s., 17-C 074.
- [9] L. Phamová a M. Richter, „TRAIN – PBN: Měření pohltivosti terénu v okolí tratě,“ VUKV a.s., 18-C 082.
- [10] VA One, <https://www.esi-group.com/cz/softwareva-reseni/virtualni-realizace/va-one>
- [11] VA One, User Guide 2019