

Jiří Pohl¹

Systemové řešení hluku železniční dopravy

Klíčová slova: železnice, tramvaje, rychlost, hluk, brzda, energie, děti

Úvod

Hluk patří k průvodním jevům mnoha uvědomělých lidských činností včetně dopravy, nevyjímaje dopravu železniční. Hluk je objektivně měřitelnou veličinou a lze jej, podobně jako jiné průřezové vlastnosti železničního dopravního systému, v určitých mezích řídit. Podmínkou řízení hluku je systémový přístup, to znamená řešení hlučnosti železničního dopravního systému spolu s ostatními jeho parametry a vlastnostmi již v průběhu navrhování subsystémů a komponent železnice.

1. Parametry železničního systému

Podle systematiky TSI je železnice tvořena čtyřmi strukturálními subsystémy:

- tratě (INS),
- elektrické napájení (ENE),
- řízení a zabezpečení (CCS),
- vozidla (RST).

Navenek působí železnice svými výslednými parametry. Tyto parametry charakterizují užitnou hodnotu železnice, pro kterou je zřizována a provozována. Jsou to zejména:

- přepravní výkonnost regionální osobní dopravy (oskm/rok),
- přepravní výkonnost dálkové osobní dopravy (oskm/rok),
- přepravní výkonnost nákladní dopravy (netto tkm/rok),
- cestovní rychlost regionální osobní dopravy (km/h),
- cestovní rychlost dálkové osobní dopravy (km/h),
- cestovní rychlost nákladní dopravy (km/h).

Železnice jako systém však působí navenek i takovými parametry, které je třeba minimalizovat. Důsledkem toho jsou buď náklady, nebo nežádoucí vnější vlivy. Jde zejména o následující parametry:

- spotřeba energie na jednotku přepravní práce (kWh/oskm, respektive kWh/netto tkm),

¹ Jiří Pohl, Ing., 1951, Vysoká škola dopravy a spojů, Fakulta strojní a elektrotechnická, Žilina, Engineer Senior, Siemens, s.r.o.

- spotřeba kapalných uhlovodíkových paliv na jednotku přepravní práce (dm^3/oskm , respektive $\text{dm}^3/\text{netto tkm}$),
- náklady na jednotku přepravní práce (Kč/oskm, respektive Kč/netto tkm),
- potřeba pracovních sil na jednotku přepravní práce (Nh/oskm, respektive Nh/netto tkm).

K těmto parametrům patří i emise hluku. Tedy to, jakým akustickým výkonem, respektive akustickým tlakem (v určitém místě) působí železnice na své okolí.

Stojí však za povšimnutí, že emise hluku způsobené železnicí jsou hodnoceny absolutně (dB), nikoliv v přepočtu na jednotku přepravního toku ($\text{dB}/(\text{osob}/\text{h})$, respektive $\text{dB}/(\text{netto t}/\text{h})$).

Negativní dopad železnice na životní prostředí je tedy hodnocen jen absolutně. Nikoliv ve vztahu k užitečné přepravní práci, kterou železnice pro společnost vykonává. To není systémově správné. Negativní dopady uvědomělých činností je potřebné hodnotit v relaci k cílům a přínosům, kvůli kterým jsou prováděny. Teprve pak mohou být objektivně posuzovány, zejména ve srovnání železnice s jinými způsoby dopravy.

2. Struktura hluku emitovaného železnicí

Na úroveň hluku emitovaného železnicí mají přímý vliv zejména její subsystemy INS a RST, nepřímo jej ovlivňuje i subsystem ENE (elektrická vozba je, nebo není umožněna).

Jízdu vlaku po železniční trati generuje akustický výkon, který má čtyři základní složky:

- **základní** (klidovou), na rychlosti jízdy nezávislou složku $P_z = k \cdot v^0$;
- **trakční**, na rychlosti jízdy přibližně lineárně závislou složku $P_t = k \cdot v^1$;
- **valivou**, na rychlosti jízdy kubicky závislou složku $P_v = k \cdot v^3$;
- **aerodynamickou**, na rychlosti jízdy vyššími mocninami závislou složku $P_a = k \cdot v^n$.

Celkový akustický (hlukový) výkon železnice vyvolaný vlakem je součtem těchto složek: $P = P_z + P_t + P_v + P_a$.

Základní (klidová), na rychlosti jízdy nezávislá složka $P_z = k \cdot v^0$

Tato hluková složka je tvořena agregáty činnými i při stojícím vlaku (topení, klimatizace, statické měniče pro napájení palubních sítí, kompresory...).

Při zdvojnásobení rychlosti ($v' = 2v$) zůstává tato složka nezměněna:

$$L_z' = 10 \log (P_z'/P_z) = L_z + 10 \log (v'/v)^0 = L_z + 10 \cdot 0 \cdot \log 2 = L_z + 10 \cdot 0 \cdot 0,3 = L_z + 0.$$

Trakční, na rychlosti jízdy lineárně závislá složka $P_t = k \cdot v^1$

Tato hluková složka je generována komponenty trakčního pohonu (trakční motor, převodovka). V oblasti rychlostí jízdy, ve které je tato složka dominantní (rozjezdu stálou silou), má na rychlosti jízdy lineární průběh.

Při zdvojnásobení rychlosti ($v' = 2v$) vzroste tato složka o 3 dB:

$$L_t' = 10 \log (P_t' / P_t) = L_t + 10 \log (v' / v)^1 = L_t + 10 \cdot 1 \cdot \log 2 = L_t + 10 \cdot 1 \cdot 0,3 = L_t + 3 \text{ dB}$$

Valivá, na rychlosti jízdy kubicky závislá složka $P_v = k \cdot v^3$

Tato hluková složka je generována valením kola po kolejnici.

Při zdvojnásobení rychlosti ($v' = 2v$) vzroste tato složka o 9 dB:

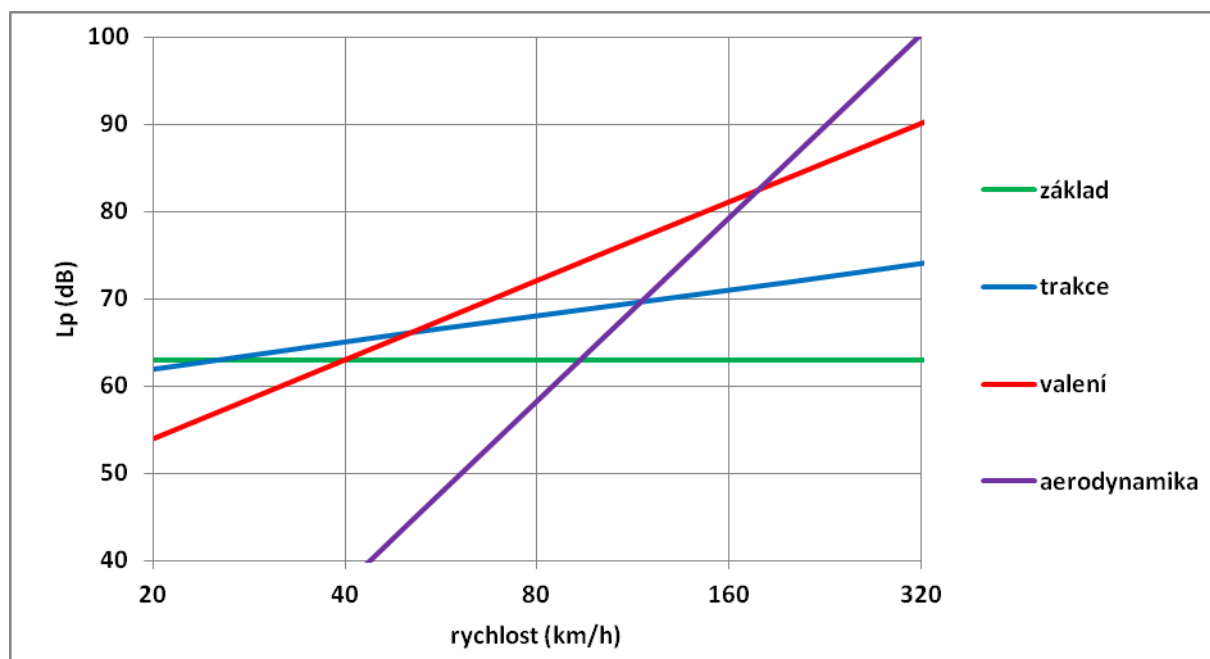
$$L_v' = 10 \log (P_v' / P_v) = L_v + 10 \log (v' / v)^3 = L_v + 10 \cdot 3 \cdot \log 2 = L_v + 10 \cdot 3 \cdot 0,3 = L_v + 9 \text{ dB}$$

Aerodynamická, na rychlosti jízdy vyššími mocninami (zhruba $n = 7$) závislá složka $P_a = k \cdot v^7$

Tato hluková složka je generována povrchem vozidla částmi na jeho povrchu (sběrač proudu a další vn přístroje, madla, antény, ...).

Při zdvojnásobení rychlosti ($v' = 2v$) vzroste tato složka o 21 dB:

$$L_a' = 10 \log (P_a' / P_a) = L_a + 10 \log (v' / v)^7 = L_a + 10 \cdot 7 \cdot \log 2 = L_a + 10 \cdot 7 \cdot 0,3 = L_a + 21 \text{ dB}$$



Obr. 1 - Složky hluku emitovaného železnicí (princip)

Jakkoliv je z výše uvedeného zřejmé, že akustický výkon emitovaný jedoucím vlakem roste s jeho rychlostí, není vliv rychlosti na posuzování hlučnosti železnice pouze negativní. Jednotlivá vozidla jsou hodnocena podle okamžité hodnoty akustického výkonu, který generují (a který se projevuje jako akustický tlak v určité vzdálenosti od nich), a ten podle výše uvedených vztahů roste s rychlostí jejich jízdy. Železnice jako systém je hodnocena podle ekvivalentní hladiny akustického tlaku hluku. V zásadě tedy podle celkové akustické energie, kterou za určitou dobu produkuje. Tato energie závisí nejen na akustickém výkonu, ale i na době jeho působení, tj. na době průjezdu vlaku určitým místem. Akustický výkon roste (jak je výše uvedeno) s rychlostí jízdy vlaku. Doba průjezdu vlaku určitým místem však klesá s rostoucí rychlostí jízdy vlaku ($T = L/v$).

Jinými slovy: rychleji jedoucí vlak zatěžuje okolí vyššími hodnotami akustického tlaku, ale po kratší dobu, což bere hodnocení dopravních systémů podle ekvivalentní hladiny akustického tlaku v úvahu. Velmi zjednodušeně lze říci, že okamžité hodnoty akustického tlaku rostou (v rozsahu rychlostí s dominantním hlukem valení) se třetí mocninou rychlosti, ale ekvivalentní hladiny akustického tlaku rostou zhruba jen s druhou mocninou rychlosti. Tedy z hlediska hodnocení železnice podle ekvivalentní hladiny akustického tlaku lze připustit, aby byl rychleji jedoucí vlak mírně hlučnější než vlak pomalý.

3. Vývoj hluku emitovaného železnicí

Ještě v nedávné minulosti byl vnější hluk produkovaný železniční dopravou, tj. jízdou vlaku, určen zejména jeho:

- trakční složkou (typicky spalovací motory, převodovky);
- případně i základní složkou (typicky chladicí ventilátory).

V průběhu posledních let se situace změnila. Dominantní zdroje hluku jsou v současnosti jiné, zejména z důvodu:

- pokroku ve stavbě vozidel (méně hlučné agregáty);
- zvýšení rychlosti jízdy vlaků.

V současnosti jsou určujícími jiné složky hluku:

- na konvenčních železnicích (CR), které určují rychlosti zhruba do 200 km/h, je dominantní valivá složka;
- na vysokorychlostních železnicích (HS), tedy zhruba od 200 km/h, je dominantní aerodynamická složka.

4. Hlučnost konvenční železnice

Ze čtyř možných složek hluku způsobených provozem vlakové dopravy (základní neboli klidový, trakční, valivý a aerodynamický hluk) je v současné době na konvenčních železnicích s provozní rychlostí v rozsahu cca 60 až 160 km/h dominantní hluk valení. Hluk valení má dvě základní vlastnosti:

- na rozdíl od ostatních složek hluku z vlakové dopravy (základní, trakce, aerodynamika), které jsou v zásadě jen vlastnostmi samotných vozidel, je hluk valení společnou vlastností vozidel tvořících vlak a také tratě;
- rozhodující vliv na akustický výkon hluku valení má drsnost povrchu obou dotýkajících se ploch (kola a kolejnice).

Proti výchozímu stavu, který železnice dvacátého století představuje, lze technickými opatřeními významně snížit hluk valení. Pro železnici 20. století jsou typická kola zdrsněná používáním třecí brzdy s litinovými špalíky a neošetřovaný povrch koleje. Náhradou třecí špalíkové brzdy s litinovými špalíky kotoučovou brzdou (oběžné plochy kol nejsou zdrsněné, ale vyválcují se jízdou do zrcadlového lesku) lze snížit hladinu akustického výkonu hluku valení až o 9 dB, tedy lze snížit akustický výkon valení na jednu osminu. Kvalitní konstrukcí a provedením železničního svršku, přesným srovnáním polohy kolejnic a vybroušením nerovností z jejich povrchu lze snížit hladinu akustického výkonu hluku valení až o 6 dB, tedy snížit akustický výkon valení na jednu čtvrtinu. Celkem tak lze stavem dotykových ploch snížit hladinu akustického výkonu hluku valení až o $9 + 6 = 15$ dB, tedy snížit akustický výkon valení na jednu dvaatřicetinu. Souprava 32 vozů odpovídajících stavu techniky a jedoucích na kvalitní trati generuje hluk o stejném akustickém výkonu jako jediný tradiční železniční vůz jedoucí stejnou rychlostí na zanedbané trati.

4.1 Třecí špalíkové brzdy

Třecí špalíkové brzdy s litinovými špalíky mají dva negativní účinky na hlučnost železnice. Intenzivně hlučí v průběhu brzdění a zdrsnují povrch kol, což má negativní dopad na úroveň hluku valení – nejen při brzdění, ale i v dalších fázích jízdy. K zaválcování plochy kol do hladkého povrchu dochází až po ujetí velké vzdálenosti.

Vývin hluku při vlastním brzdění (při tření silou přitlačovaného špalíku o povrch kol) má některé specifické vlastnosti. Při poklesu rychlosti k nule, kdy prudce stoupá součinitel tření mezi litinovým špalíkem a povrchem kola, též prudce stoupá akustický výkon hluku brzdění. Hluk vyzařují rozkmitaná (drnčící) pákovi, proto je zvláště intenzivní u starších vozidel s dlouhým brzdovým pákovím (s brzdovým válcem umístěným na rámu vozu a s rozvodem přitlačné síly do podvozků a odtud ke dvojkolím dlouhými táhly). Hluk při brzdění litinovými špalíky obsahuje (zejména v nízkých rychlostech těsně před zastavením) složky o velmi vysoké frekvenci.

Také zvýšení hluku valení, způsobené zdrsněním povrchu kol v důsledku brzdění třecími brzdami s litinovými brzdovými špalíky, má své zákonitosti. Nejhorší akustická situace (nejdrsnější povrch jízdní plochy kol) nastává po brzdění a další jízdou

vozidla se po ujetí delší vzdálenosti povrch kol valením po kolejnici válcuje a vyhlazuje.

Z tohoto důvodu jsou horší provozní akustické parametry vozů provozovaných na tratích v horách a u vlaků s častými zastávkami (tj. s vysokou četností brzdění). Lepší stav je u vozů provozovaných na tratích v rovinách a bez zastávek (tj. s malou četností brzdění). Z toho lze vyvodit, že jsou velmi hlučné zejména osobní zastávkové vlaky a rychlíky nižší kategorie, které často zastavují, respektive osobní i nákladní vlaky, které sjíždějí táhlé velké spády, pokud používají litinové brzdové špalíky.

Jak z energetických, tak i z akustických důvodů je tedy potřebné potenciální i kinetickou energii vlaku prioritně přeměňovat elektrodynamickou rekuperační brzdou v elektrickou energii a předávat ji k dalšímu využití. Nikoliv ji třením mařit přeměnou v teplo a ještě k tomu generovat hluk. Přitom zvýšená hlučnost provází vozidla s brzdami s litinovými špalíky jak při brzdění, tak vlivem drsných kol i v průběhu další jízdy vlaku. S ohledem na převládající dobu jízdy bez brzdění nad dobou vlastního brzdění je z hlediska vlivu litinových špalíkových brzd na hlučnost vlakové dopravy rozhodující právě jejich nepříznivý dopad na stav povrchu kol. Nikoliv hluk při vlastním brzdění.

Přínos kotoučové brzdy a s ní související nezdrsněný, zrcadlově hladký povrch jízdni plochy kol je pro hlučnost vlaku značný. Vůz s koly zdrsněnými litinovými špalíky generuje při jízdě, jak je výše uvedeno, zhruba osmkrát vyšší akustický výkon (+9 dB) než stejně rychle jedoucí vůz s hladkými koly.

Příznivě akusticky působí i snížení drsnosti druhé dotykové plochy styku kola s kolejnici, tedy kolejnice. Vyrovnávání polohy kolejnice podbíjením štěrkového lože se použitím moderních traťových strojů výrazně zlepšilo. Avšak touto technologií nelze dosáhnout úplné shody skutečnosti s požadovanou polohou temene kolejnic. K docílení klidného chodu vozidel proto bylo zavedeno broušení kolejnic, které dokáže zbytkové nerovnosti výrazně snížit. Lokální nerovnosti jsou prakticky odstraněny, skutečná geometrická poloha temene kolejnic se téměř shoduje s požadovanou. Přitom je pozoruhodné, že broušením docílená geometrie povrchu kolejnic s malými odchylkami (tolerancemi) od ideálního stavu je v dlouhodobém měřítku stabilnější než pouhým podbíjením docílená geometrie povrchu kolejnic s většími odchylkami od ideálního stavu.

Příčinou dlouhodobé stability přesné geometrické polohy povrchu broušených kolejnic je právě minimalizace tolerančního rozptylu. Ta totiž snižuje velikost dynamických sil, které působí mezi vozidly a tratí. Naopak nerovnosti tratě vedou ke vzniku dynamických sil, které provázejí jízdu vlaku a které trať ještě více deformují. Kvalita tratě se lavinovitě zhoršuje (účinkem kladné zpětné vazby). Právě vytvořením rovného povrchu broušením hlav kolejnic se trať uvede do stavu, který nevede k iniciaci tohoto procesu.

Zavádění kotoučových brzd a broušení kolejnic, tedy snížení drsnosti povrchu kol i kolejnic, snižuje hluk valení, což je ale paradoxně jen vedlejší průvodní jev. Obě tato

opatření byla zavedena z jiných důvodů. Primárním důvodem k náhradě špalíkových brzd kotoučovými brzdami je odstranění tepelného namáhání oběžné plochy kol v průběhu brzdění (s potenciálem nebezpečí tvorby martenzitu a tím i iniciace trhlin).

Přechod na kotoučové brzdy souvisí zejména se zvyšováním rychlosti jízdy vlaků osobní dopravy. Vyšší výkony brzd související s vyššími rychlostmi jízdy totiž nelze koncentrovat do nevelké plochy povrchu kol s omezenými možnostmi vyzařování tepla. Primárním důvodem k broušení hlav kolejnic je také zklidnění chodu vozidel s cílem snížit rázy dynamických sil. Díky minimalizaci oscilací dynamických sil zůstává geometrie koleje s vybroušeným povrchem kolejnic dlouhodobě stabilní. Obě vysoce účinná opatření ke snížení hluku železnic (dohromady až -15 dB) nebyla tedy prvotně zavedena s cílem snížit hluk k tíži nákladů protihlukových opatření, ale ze zcela jiných důvodů. Z hlediska řízených snah o snížení hlučnosti železnice šlo o činnost neúmyslnou. O souvislost, která vznikla v podstatě náhodně.

4.2 Řešení moderních vozidel s nízkou úrovní hlučnosti

Ačkoliv vznikla některá zásadní protihluková opatření neúmyslně, v současnosti je situace jiná. Hlučnost je chápána jako jedna ze základních a garantovaných průřezových vlastností vozidla. Management hluku je neopomenutelnou činností při navrhování vozidla. Stejně tak jako vozidlo nesmí překročit limit hmotnosti, dovolenou úroveň elektromagnetických polí či linii obrysu, musí splnit požadované hodnoty vnějšího i vnitřního hluku. Základním principem je pokud možno potlačovat hluk v místě zdrojů, tedy snižovat akustický výkon těchto zdrojů. Vždy jde o cílený soubor protihlukových opatření, uskutečněných v jednotlivých subsystémech vozidla:

- **motorové lokomotivy:** umístění dieselagregátu v odhlučněné strojovně, účinné tlumiče sání a výfuku spalovacího motoru, odhlučněný systém chlazení, měkce vypružené podvozky s odpruženě uloženými trakčními motory, hladký povrch kol (elektrodynamická a kotoučová brzda), hladká zaoblená karoserie;
- **elektrické lokomotivy:** umístění komponent v odhlučněné strojovně, vodou chlazené polovodičové měniče, řízení chlazení podle zatížení, měkce vypružené podvozky s plně odpruženě uloženými trakčními motory, hladký povrch kol (kotoučová a elektrodynamická rekuperační brzda), hladká zaoblená karoserie;
- **osobní železniční vozy:** žádné ostré hrany, hladké podélné linie, zakrytí komponent na spodku vozidla, měkce vypružené podvozky, hladký povrch kol (kotoučová brzda), tlakotěsnost (pro snížení vnitřní hlučnosti), hladká zaoblená karoserie;
- **netrakční jednotky:** protáhlý tvar čela, žádné ostré hrany, hladké podélné linie, zakrytí komponent na spodku vozidla, pneumaticky vypružené podvozky, hladký povrch kol (kotoučová brzda), těsné mezivozové přechody (pro snížení vnitřní hlučnosti), tlakotěsnost (pro snížení vnitřní hlučnosti), hladká zaoblená karoserie;
- **trakční jednotky:** protáhlý tvar čel, velké poloměry zaoblení, hladké podélné linie, zakrytí komponent na spodku vozidla, pneumaticky vypružené podvozky, hladký povrch kol (kotoučová a elektrodynamická rekuperační brzda), těsné

mezivozové přechody (pro snížení vnitřní hlučnosti), tlakotěsnost (pro snížení vnitřní hlučnosti), pečlivé řešení střešní elektrické výzbroje.

4.3 Snížování hlučnosti nákladních vozů

Na rozdíl od lokomotiv, trakčních jednotek a osobních vozů, u kterých byla zavedena kotoučová brzda z funkčních důvodů (tj. výkonnost brzdy), je u nákladních vozů situace složitější. Levná třecí brzda s litinovými špalíky je u nich stále standardem.

Pro snížení hlučnosti je pro nákladní vozy hledána jednodušší cesta k hladkým kolům (a tím i nižší hlučnosti), než jakým je kotoučová brzda. Tou jsou nekovové brzdové špalíky místo litinových. Nekovové brzdové špalíky mají ve srovnání se špalíky z litiny nejen schopnost nezdrsňovat povrch kol, ale i vyšší a stálější součinitel tření. Skutečnost, že při konstrukci nových vozů lze potřebnou brzdovou sílu vyvolat menší přitlačnou silou, je výhodou. Brzdové válce mohou být menší a pákovi lehčí. Vyšší součinitel tření však komplikuje aplikaci nekovových špalíků na starších, již provozovaných nákladních vozech, jejichž brzdy byly navrženy pro špalíky z litiny. Jejich brzdové ústrojí je potřeba upravit tak, aby došlo ke snížení přitlačné síly. To je technicky řešitelné, ale je nutno vynaložit určité náklady na úpravu brzd vozu.

Pro zjednodušení zpětných úprav starších vozů jsou proto vyvíjeny nekovové brzdové špalíky, které mají zhruba stejný součinitel tření jako špalíky litinové. Při náhradě litinových brzdových zdrží tímto druhem nekovových zdrží proto není nutné upravovat brzdový systém vozidla.

V superpozici s trendem zvýšení rychlosti jízdy nákladních vlaků, který je motivován jak vyšší atraktivitou nákladní dopravy, tak i větší produktivitou vozidel i personálu, je přechod nákladních vozů na nekovové brzdové špalíky, které nezdrsňují povrch oběžné plochy kol, velmi potřebný. Ovšem je nutné jej provést hromadně, neboť akustický výkon hluku valení vozů s litinovými špalíky je násobně vyšší než akustický výkon hluku valení vozů s nekovovými špalíky. Proto by přítomnost i jen několika vozů s koly zdrsněnými litinovými špalíky v soupravě nákladního vlaku s většinou vozů s nekovovými brzdovými špalíky, tedy s hladkými koly, kazila výsledný akustický efekt. Z těchto důvodů se například Švýcarsko rozhodlo nepouštět na své území od roku 2020 žádné nákladní vozy s litinovými brzdovými špalíky.

4.4 Aerodynamický hluk

Aerodynamická složka hluku se u jedoucího vlaku stává dominantní až při rychlostech nad 200 km/h, tedy na vysokorychlostních železnicích. Přesto nelze podcenit význam aerodynamického hluku ani na konvenčních železnicích. Hluk je určitá forma energie. Proto jsou zásady minimalizace aerodynamické složky hluku velmi blízké zásadám minimalizace jízdního odporu:

- žádné ostré hrany,
- vše zaobleno patřičně velkým poloměrem (alespoň 20 % šířky),
- žádné kolmé čelní plochy,
- žádné výčnělky.

Všeobecně platí, že vozidla pečlivě aerodynamicky řešená s cílem nízké spotřeby energie mají i příznivé vlastnosti v oblasti aeroakustiky. Zvláštní pozornost si zaslouží sběrače proudu (jde o souhrn funkčních vlastností – vliv rychlosti jízdy na funkci sběrače a zabránění generování hluku) a vznik nízkofrekvenčních složek hluku (infrazvuk u hranatých vozidel s kolmými plochami) – nebezpečí únavy strojvedoucího.

5. Zvyšování rychlosti

5.1 Systémové řešení železnice pro rychlost 120 km/h

V druhé polovině dvacátého století byly v ČR budovány železnice pro rychlost 120 km/h. Jakkoliv byla rychlost 120 km/h zavedena jen velmi omezeně (pouze vybrané úseky mezi Prahou a Přerovem), byla na tuto rychlost dimenzována řada technických zařízení: lokomotivy (498.0, 498.1, E 499.0, S 499.0), motorové vozy (M 296.1,2), osobní vozy (Aa, Ba, BRa, Bac, BRa...), rychlíková špalíková brzda DAKO R, převýšení v obloucích, zabezpečení výhybek, světelná rychlostní návěsní soustava, automatický blok se zábrzdou vzdáleností 1 000 m, liniový vlakový zabezpečovač, řetězovkové trakční vedení s přídatným lanem, trakční napájecí stanice, výkonově navržené pro lokomotivy o výkonu 2 až 4 MW.

5.2 Systémové řešení železnice pro rychlost 160 km/h

V některých evropských zemích byla v průběhu druhé poloviny dvacátého století zavedena rychlost 160 km/h. Systémový přístup byl založen na následujících krocích. Vlaky jedoucí touto rychlostí musejí být brzděny tak, aby bezpečně zastavily na dráze dlouhé 1 000 m. To vyžaduje brzdou R + MG s brzdým účinkem 208 %, která je reálně proveditelná pouze jako kotoučová. Zvýšení rychlosti jízdy ze 120 km/h na 160 km/h vede fyzikálně ke zvýšení výkonu hluku valení o 3,7 dB ($30 \log(160/120) = 3,7$). Tento nárůst však byl s rezervou kompenzován přechodem od kol zdrsněných litinovými špalíky na hladká kola s efektem až -9 dB. Nebylo nutné činit žádná další protihluková opatření, neboť vlaky jezdící rychlostí 160 km/h byly díky přechodu na kotoučovou brzdou méně hlučné než původní vozidla jezdící rychlostí 120 km/h („stará hluková zátěž“). Systémové jízdní doby pro taktový jízdní řád rychlíků byly konstruovány na rychlost 160 km/h, neboť všechny odpovídající vlaky byly sestaveny z vozidel, která ji dovedou využít. Výsledkem je, že na trati s rychlostí 160 km/h jezdí vlaky rychlostí 160 km/h, a to bez protihlukových stěn.

5.3 Řešení železnice pro rychlost 160 km/h v ČR

V České republice byla na přelomu dvacátého a jednadvacátého století zavedena rychlost 160 km/h nákladnými úpravami na straně infrastruktury (upgrade tratí tranzitních koridorů) – ovšem bez provedení tomu úměrné systematické obnovy parku vozidel. Odklad investice do nákupu nových vozidel se projevil řadou důsledků. V provozu byly ponechány vozy se špalíkovou brzdou, která omezuje jejich nejvyšší provozní rychlost na 140 km/h. Neprovedení řádově nižší investice do vozidel znemožnilo plnohodnotně využívat parametry řádově vyšší investice do dopravní cesty. Vozidla brzděná špalíkovou brzdou (s litinovými špalíky) jsou hlučná, vyšší

rychlost jízdy zvyšuje jejich akustický výkon, a to jak přímo (efektem třetí mocniny), tak i nepřímo (zvýšeným zdrsněním kol intenzivnějším brzděním). To má vliv jak na kulturu cestování vlakem, tak i na okolí tratě. Podél tratí byla učiněna pasivní protihluková opatření s nákladem cca 2 miliardy Kč (i když skutečná hluková zátěž okolí tratě je vlivem kvalitnějšího železničního svršku a poklesu rozsahu nákladní dopravy zpravidla nižší než před provedením její modernizace). Systémové jízdní doby pro taktový jízdní řád rychlíků byly konstruovány na rychlost 140 km/h, neboť ne všechny odpovídající vlaky byly sestaveny z vozidel, která dovedou využít rychlost 160 km/h.

V zásadě lze konstatovat, že z hlediska řešení hluku způsobovaného železniční dopravou byla infrastruktura s životností kolem 100 let přizpůsobena vozidlům s životností kolem 30 let, a to právě dožívajícím. Navíc vozidlům, která neplní (a principiálně nejsou schopna splnit) požadavky TSI noise. Důsledkem bylo, že na nákladně modernizovaných tratích pro rychlosti 160 km/h jezdily četné vlaky rychlostí jen 140 km/h, a to za protihlukovými stěnami. Až dodatečně bylo železnici umožněno investovat do nákupu moderních tichých vozidel s kotoučovými brzdami, která v zásadě protihlukové stěny nepotřebují a která dokážou využít plné traťové rychlosti. Navíc na rozdíl od protihlukových stěn snižují investice do nových vozidel hluk nejen v ojedinělých místech, ale v celé délce jejich vozebních ramen.

6. Protihlukové stěny

Protihlukové stěny se v České republice staly charakteristickým prvkem nejen pro protihluková opatření, ale i pro modernizované tratě všeobecně. Přesto (respektive i právě proto) je nutno povšimnout si také jejich negativ: energii hluku z převážné části nepohlcují, ale jen odrážejí jinam, z hlediska zákazníka železnice (cestujícího) i zaměstnanců železnice (vlakový personál) jsou tyto stěny nikoliv protihlukové, ale prohlukové (zvyšují úroveň vnitřního hluku ve vozidlech), brání zákazníkům železnice sledovat krajinu podél trati, zhoršují přístup k trati při její údržbě a při mimořádných událostech, v krajině jsou nevzhledné, mnohdy jsou stavěny proti vůli těch, které mají chránit, a jsou velmi drahé.

Vzájemné relace směrných cen liniových staveb dokládají, že protihlukové stěny jsou drahé nejen absolutně, ale i relativně, a to jak v porovnání s jinými stavbami, tak s přinášeným efektem. Jednostranná protihluková zeď stojí řádově 20 mil. Kč/km a přinese mírné snížení intenzity hluku v okolí železnice. Elektrizace jedné traťové koleje (trakční vedení plus trakční napájecí stanice) vyžaduje zhruba 10 mil. Kč/km s efektem poklesu nákladů na trakční energii (ve srovnání s naftou) na 1/3 až 1/4. Při instalaci ETCS Level 2 pro jednu traťovou kolej za přibližně 2 mil. Kč/km dochází ke zvýšení bezpečnosti (odstranění železničních nehod způsobených přehlédnutím či nerespektováním návěstí).

7. Snižování hlučnosti tramvají

Základem užité hodnoty tramvaje je pouličnost, tj. schopnost pohybovat se po dráze vedené v těsné blízkosti obytných budov. To však pochopitelně vyžaduje, aby tramvaj byla ohleduplná vůči svému okolí, a to i v oblasti hluku generovaného tramvajovou dopravou.

Hluk je KO kritériem pro provoz tramvají: odmítnutí stavby tramvajové tratě Kobylisy – Bohnice občany Prahy 8, náhrada nočních tramvají nočními autobusy v Brně (plus další výhody), snížení rychlosti jízdy tramvají na vybraných úsecích v Praze v nočních hodinách z 50 km/h na 40 km/h (efekt cca: $30\log(40/50) = -3$ dB).

Řešeními na straně infrastruktury jsou: broušení kolejnic, pohlcování hluku místo odrazení hluku (zatravňování, respektive štěrková lože versus betonové panely).

Řešeními na straně vozidel jsou aplikace pryžových prvků ve vypružení, hladká kola (ne mnohohranná – kvalitní protismyková ochrana), zakrytí podvozků plentami (dodatečně: T3, KT8, T6A5), zastínění podvozků dřevěným bedněním (Viedeň), potlačení kvílení v obloucích (vypružení kol s úmyslem zmenšit frekvenci torzních kmitů dvojkolí při průjezdu oblouků o malém poloměru, respektive aplikace pojezdů s volnými koly).

8. Spotřeba energie pro vytváření hluku

Hluk provázející jízdu vlaku je určitou formou energie. To přirozeně vyvolává dvě základní otázky. Kde se tato energie bere? Kdo tuto energii platí? Do energie hluku se přeměňuje část trakční práce vytvořené trakčním pohonem vlaku $A = \int F \, dL$. Základem trakční práce je vynaložení síly na překonání jízdního odporu $F_0 = A + B \cdot v + C \cdot v^2 = m \cdot g \cdot (a + b \cdot v + c \cdot v^2)$, kde:

a konstantní složka (valení, ložiska);

$b \cdot v$ lineární složka (neklidný chod – kmitání a jeho tlumení);

$c \cdot v^2$ kvadratická složka (aerodynamika a vlastní ventilace).

8.1 Jízdní odpor – konstantní složka (valení)

V současné době prováděné zkoušky moderních vozidel s kotoučovou brzdou vedou ke zjištění konstantní složky měrného jízdního odporu, který vyjadřuje vliv součinitele valivého tření, v hodnotě přibližně $a = 1,0$ N/kN. Přitom měřením na prázdných a naložených (obsazených) vozech téhož typu byla tato hodnota shledána naprosto neměnnou (shodnost i v řádu setin). To je znatelně méně, než tomu bylo v nedávné minulosti (v 60. až 80. letech minulého století), kdy bývaly u nových vozidel brzděných litinovými špalíky zjišťovány měřením hodnoty zhruba $a = 1,5$ N/kN pro ložené, respektive těžké vozy, $a = 2,0$ N/kN pro prázdné, respektive lehké vozy.

Lze odvozovat, že tento pokles měrného jízdního odporu souvisí s přechodem z brzdění litinovými špalíky na kotoučové brzdy. Hladká kola mají menší součinitel

valivého tření a odpadají zbytkové síly způsobené nedokonale odlehlými brzdovými špalíky (ty jsou absolutně stálé, a proto relativně vyšší u prázdných vozů).

Bude-li v zájmu snížení hluku na železnicích v ČR zcela upuštěno od třecích brzd s litinovými špalíky, dojde primárně k významnému snížení hluku vlakové dopravy (až o 9 dB), a to celoplošně na všech tratích v celé síti. Sekundárně dojde ke snížení valivé složky jízdního odporu (v průměru odhadem o cca 0,7 N/kN) s významným dopadem na pokles spotřeby energie.

Pro celou síť českých železnic s ročním dopravním výkonem $D = 60$ miliard tkm lze odhadnout úsporu trakční práce:

$$\Delta A = \Delta p \cdot m \cdot g \cdot L = \Delta p \cdot D \cdot g = 0,7 \cdot 60\,000\,000\,000 \cdot 9,81/3\,600 = 115\,000\,000 \text{ kWh/rok.}$$

Vytváření hluku je energeticky náročné. Odhadnutá úspora trakční práce vede k úspoře nákladů na elektrickou energii a na motorovou naftu. Při 80% podílu elektrické vozby činí úspora elektrické energie:

$$\Delta E = k \cdot \Delta A / \eta = 0,8 \cdot 115\,000\,000 / 0,7 = 131 \text{ kWh/rok (tedy při ceně 2,5 Kč/kWh činí úspora cca 329 mil. Kč/rok).}$$

Při 20% podílu motorové vozby činí úspora motorové nafty:

$$\Delta B = (1 - k) \cdot \Delta A / \eta / H = (1 - 0,8) \cdot 115\,000\,000 / 0,3/10 = 7\,700\,000 \text{ dm}^3/\text{rok (tedy při ceně 30 Kč/dm}^3 \text{ úspora 230 mil. Kč/rok).}$$

Celková odhadnutá roční úspora:

$$\Delta C = \Delta C_e + \Delta C_n = 329 + 230 = 559 \text{ mil. Kč/rok}$$

Místo prodlužování životnosti přestárých hlučných a energeticky náročných vozidel s třecí brzdou s litinovými špalíky je lépe pořídit soudobá tichá a energeticky úsporná vozidla s hladkými koly.

8.2 Jízdní odpor – lineární složka (kmitání pojezdu)

V současné době prováděné zkoušky moderních vozidel na kvalitních tratích vedou ke zjištění lineární složky měrného jízdního odporu, která vyjadřuje vliv kmitání, tedy neklidného chodu, v nulové (neměřitelné) hodnotě: $b = 0,0 \text{ N/kN/(km/h)}$.

Přitom v nedávné minulosti (v 60. letech minulého století), bývaly měření na reálných tratích (nikoliv na zkušebním okruhu) hodnoty zhruba: $b = 0,008 \text{ N/kN/(km/h)}$.

Lze odvozovat, že tento pokles měrného jízdního odporu souvisí se změnami jak na straně infrastruktury, tak na straně vozidel:

- kolejnice v přesné geometrické poloze a s hladkým povrchem. Mimo jiné i vliv „skutečně bezstykové koleje“ – náhrada termitových svarů elektrickými, tedy nejen stálá statická poloha, ale i stálá dynamická poloha (homogenní tuhost kolejnic),
- kvalitní pojezdy vozidel, koleji přizpůsobený tvar jízdní plochy kol.

Kvalitní tratě se stálou statickou i dynamickou polohou koleje a nová moderní vozidla s technicky vyspělými pojezdy přináší primárně klidný a bezpečný chod vozidel a spolu s tím i cestovní komfort. Sekundárně dochází ke snížení kmitavé složky jízdního odporu (zhruba o cca 0,008 N/kN/(km/h)) s významným dopadem na pokles spotřeby energie. Terciálně přináší i významné snížení hluku vlakové dopravy, neboť klidně jedoucí vozidla méně hlučí.

Pro celou síť českých železnic s ročním dopravním výkonem $D = 60$ miliard tkm lze při střední rychlosti 80 km/h odhadnout úsporu trakční práce:

$$\Delta A = \Delta p \cdot m \cdot g \cdot L = \Delta p \cdot D \cdot g = 0,64 \cdot 60\,000\,000\,000 \cdot 9,81/3\,600 = 105\,000\,000 \text{ kWh/rok.}$$

Vytváření hluku je energeticky náročné. Odhadnutá úspora trakční práce vede k úspoře nákladů na elektrickou energii a na motorovou naftu. Při 80% podílu elektrické vozby činí úspora elektrické energie:

$$\Delta E = k \cdot \Delta A / \eta = 0,8 \cdot 105\,000\,000 / 0,7 = 120 \text{ kWh/rok (tedy při ceně 2,5 Kč/kWh úspora cca 300 mil. Kč/rok).}$$

Při 20% podílu motorové vozby činí úspora motorové nafty:

$$\Delta B = (1 - k) \cdot \Delta A / \eta / H = (1 - 0,8) \cdot 105\,000\,000 / 0,3/10 = 7\,000\,000 \text{ dm}^3/\text{rok (tedy při ceně 30 Kč/dm}^3 \text{ úspora 210 mil. Kč/rok).}$$

Celková odhadnutá roční úspora:

$$\Delta C = \Delta C_e + \Delta C_n = 300 + 210 = 510 \text{ mil. Kč/rok.}$$

Místo stavění protihlukových stěn je rozumnější dát do pořádku tratě a nakoupit na ně nová moderní vozidla s klidným chodem.

8.3 Jízdní odpor – kvadratická složka (aerodynamika)

V minulosti byla v ČR prakticky všemi výrobci, zejména v letech 1970 až 2000, dodávána tehdejšími ČSD vozidla, jejichž vnější tvar odpovídal nikoliv požadavkům aerodynamiky, ale tehdejšímu módnímu stylu designu (hrnaté tvary), který též byl technologicky nenáročný. Vozidla řad 753, 731, 163, 363, 460, 560, 810 a dalších podobných symbolů výtvarného stylu tehdejší doby jsou toho dokladem. Tato vozidla lze charakterizovat činitelem tvaru jejich samotné čelní partie cca 1. Hranaté tvary mají dva negativní dopady. Na velikost aerodynamické složky jízdního odporu a tím na spotřebu energie železniční dopravy a na hluk produkovaný železniční dopravou (při vyšších rychlostech).

Soudobá moderní vozidla mají pečlivě řešené vnější tvary (včetně čel) s cílem minimalizovat energetickou náročnost železniční dopravy a s příznivými účinky na jejich hluk generovaný jízdou. Typická hodnota činitele tvaru jejich samotné čelní partie je cca 0,3 u konvenčních vozidel a 0,1 u vysokorychlostních vozidel.

Dopad snížení aerodynamické složky jízdního odporu na energetickou náročnost železniční dopravy je značný. Pro celou síť českých železnic s ročním vlakovým výkonem $W = 200$ milionů vl. km lze pro efektivní rychlost 80 km/h odhadnout úsporu trakční práce způsobenou toliko záměnou hranatých čel trakčních vozidel za zaoblená:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \Delta C_x \cdot S \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L/3,6^2/3\,600 = \\ &= (1 - 0,3) \cdot 12 \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 80^2/3,6^2 \cdot 150\,000\,000/3\,600 = 108\,000\,000 \text{ kWh/rok.}\end{aligned}$$

Toto snížení aerodynamické složky trakční práce je provázáno i odpovídajícím snížením aerodynamické složky hluku. Odhadnutá úspora trakční práce vede k úspoře nákladů na elektrickou energii a na motorovou naftu.

Při 80% podílu elektrické vozby činí úspora elektrické energie:

$$\Delta E = k \cdot \Delta A/\eta = 0,8 \cdot 108\,000\,000/0,7 = 123 \text{ kWh/rok (tedy při ceně 2,5 Kč/kWh úspora cca 309 mil. Kč/rok).}$$

Při 20% podílu motorové vozby činí úspora motorové nafty:

$$\Delta B = (1 - k) \cdot \Delta A/\eta/H = (1 - 0,8) \cdot 108\,000\,000/0,3/10 = 7\,200\,000 \text{ dm}^3/\text{rok (tedy při ceně 30 Kč/dm}^3 \text{ úspora 216 mil. Kč/rok).}$$

Celková odhadnutá roční úspora:

$$\Delta C = \Delta C_e + \Delta C_n = 309 + 216 = 525 \text{ mil. Kč/rok.}$$

Místo prodlužování životnosti přestárých hlučných a energeticky náročných vozidel s hranatými tvary je lepším řešením pořídit soudobá, tichá a energeticky úsporná vozidla se zaoblenými tvary.

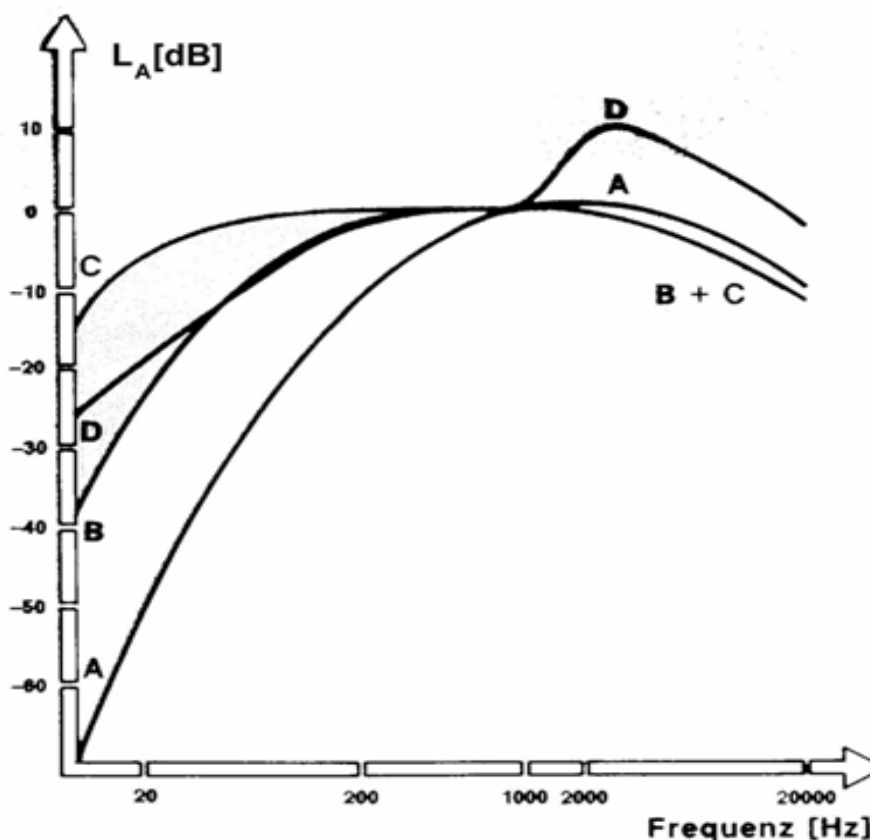
Technická dokonalost moderních vozidel v sobě spojuje nízkou spotřebu energie, klidný chod a nízké emise hluku. Nevytvářením hluku lze ušetřit náklady na energii a odstraňování následků opotřebení. Výše vyčíslené úspory jsou jen směrné odhady, nikoliv přesná čísla, avšak přesto je užitečné se nad nimi zamyslet.

9. Specifika působení hluku na děti

Před zhruba dvaceti lety došlo v ČR ke snížení porodnosti z cca 130 000 narozených dětí ročně na cca 80 000 až 90 000 narozených dětí ročně. V důsledku toho je v ČR v současnosti o zhruba 900 000 méně dětí než před 30 lety. Děti bychom si měli vážit, neboť jsou budoucností světa. Nikoliv je diskriminovat. Proto stojí za povšimnutí, jak lhostejně se chovají dospělí vůči dětem při posuzování hluku.

Podmínkou technické způsobilosti technických zařízení k jejich provozu je splnění určitých akustických parametrů (akustický výkon, případně akustický tlak zjišťovaný v určité vzdálenosti od zařízení).

Ke zjištění těchto hodnot jsou prováděna podrobná a fyzikálně správná měření. Naměřené hodnoty hluku (W , Pa, respektive W/m^2) jsou však nejprve korigovány filtrem A, který vyjadřuje subjektivní vnímání intenzity zvuku (druhé mocniny akustického tlaku) člověkem. Dospělý člověk vnímá jen zvuky v rozsahu cca 20 Hz až 20 kHz. Této skutečnosti je přizpůsoben i filtr A, který vyhodnocuje pouze zvuky do 20 kHz, frekvence vyšší než 20 kHz neuvažuje.



Obr. 2 - Váhové filtry pro hodnocení účinků hluku na lidský organismus

9.1 Dětské ouško

Frekvenční rozsah funkčnosti lidského ucha je na základě fyzikálních principů úměrný jeho rozměrům. Tóny s frekvencí nad 20 kHz nejsou schopny rozechvít sluchové ústrojí dospělého (které je matematicky modelováno filtrem). Avšak dětské ouško je schopno vnímat i tóny vyšší než 20 kHz, neboť jeho sluchové ústrojí je geometricky menší. Proto jej mohou rozechvít i vyšší tóny s menší vlnovou délkou (analogie: průměr výškového reproduktoru je menší než průměr hloubkového reproduktoru).

V důsledku toho dochází při měření a vyhodnocování hluku k metodické chybě. Hluk je posuzován jen podle toho, jak jej vnímají dospělí, nikoliv podle toho, jak jej vnímají děti. To není správné, neměli bychom zapomínat na to, jak hluk působí na děti.

Vysoké tóny hluku, které děti dobře slyší, jsou při hodnocení hlukového prostředí díky způsobu, kterým je definován filtr A (jež modeluje ucho dospělého člověka):

- při frekvencích kolem 10 kHz – 20 Hz vyhodnocovány slaběji, než jak skutečně působí a než jak je děti vnímají;
- při frekvencích nad 20 kHz jsou zcela opomenuty, avšak přitom ve skutečnosti objektivně existují a děti je vnímají.

Popsaná metodická chyba způsobuje, že dětem může působit potíže prostředí, které je podle všeobecně používaných akustických a hygienických norem a předpisů zcela v pořádku. Situace je o to komplikovanější, že dospělí lidé vysokofrekvenční hluk neslyší, a tedy o něm vůbec nevědí. Takže nepodnikají kroky k jeho změření a následnému odstranění.

Tato skutečnost platí všeobecně a nevyhýbá se ani kolejovým vozidlům. Lze to doložit dvěma skutečnými příklady. Prvním příkladem je modernizace tramvají KT4 ve městě Gera. Druhým příkladem je skřípění brzd osobních železničních vozů.

9.2 Tramvaje KT4 ve městě Gera

Po rekonstrukci elektrické výzbroje tramvají KT4 na pulzní řízení bylo pozorováno, že děti v kočárku se po chvíli pobytu v tramvaji rozpláčou. Prvotní podezření na vliv elektromagnetického pole bylo vyvráceno měřením polí. Příčina nebyla nalezena, až nakonec byla jedním zkušeným pediatrem shledána v akustice. Kabel k brzdovému odporu byl na střechu veden okenním sloupkem. Magnetickými účinky proudu se sloupek mechanicky rozkmitával. Jím generovaný zvuk měl tónový charakter, což je pro člověka obzvlášť nepříjemné. Avšak jeho frekvence mírně překračovala 20 kHz, tedy jej dospělí neslyšeli a při hodnocení výsledků měření byl účinkem filtru A anulován.

Shodou náhod byl právě v těsné blízkosti tohoto sloupku prostor, vyhrazený pro přepravu dětských kočárků. Dětem tento zvuk (navíc tónového charakteru) velmi vadil, a proto plakaly. Problém nebyl snadno identifikovatelný, neboť dospělí lidé svými ušima žádný zvuk vydávaný sloupkem neslyšeli. Proto o něm vůbec nevěděli. Ani výsledky měření filtrem A korigovaných hladin akustického tlaku L_{pA} nenaznačovalo žádné příčiny nespokojenosti malých dětí. Po objasnění příčiny neklidného chování dětí se uvedenou vadu podařilo snadno vyřešit jednoduchou úpravou sloupku s kabelovým vedením.

9.3 Skřípění brzd osobních železničních vozů

Osobní vozy dodávané bývalými ČSD v 60. a 70. letech minulého století vyvozují při brzdění, zejména těsně před zastavením, tedy v oblasti nárůstu součinitele tření

mezi litinovým brzdovým špalíkem a povrchem kola, pískavý zvuk. Snad nejvíce je tento jev patrný u vozů bývalé řady Baim (později Bnp, 053, 054, ...).

Stojí za povšimnutí, že děti, které stojí na nástupišti a čekají na vlak (tedy jsou jen několik metrů vzdáleni od jeho podvozků (a pokud je nástupiště nízké, tak i téměř ve výšce podvozku) si při brzdění zastavujícího vlaku zakrývají rukama obě uši. Malé děti se při působení tohoto hluku rozpláčou (ověřeno náhodným pokusem). Z toho lze odvozovat, že ve spektru zvuku skřípaní brzd jsou pravděpodobně významně obsaženy složky na vyšších frekvencích, které vnímá dětské ouško podstatně silněji než dospělý člověk, respektive než jak je ohodnocuje filtr A. Jistě by stálo za to, tyto jevy blíže analyzovat a brát ohled při posuzování hluku vyvolaného provozem železniční dopravy nejen na dospělé, ale i na děti.

Závěr

Hluk je průřezovou vlastností železničního systému. Proto je účelné systematicky jej řešit spolu s dalšími parametry a průřezovými vlastnostmi již při návrhu komponent železničních subsystémů. Dodatečné konstatování úrovně hluku a pozdě vznikající snaha o potlačování jeho následků různými extenzivními pasivními opatřeními není efektivní cestou.

Literatura

- [1] POHL, Jiří. Rychlá železniční osobní doprava, díl třináctý. *Železniční magazín*, 2009, č. 4, s. 15 – 19.

Praha, září 2012

Lektoroval: Ing. Jan Hlaváček
VUZ, a.s.