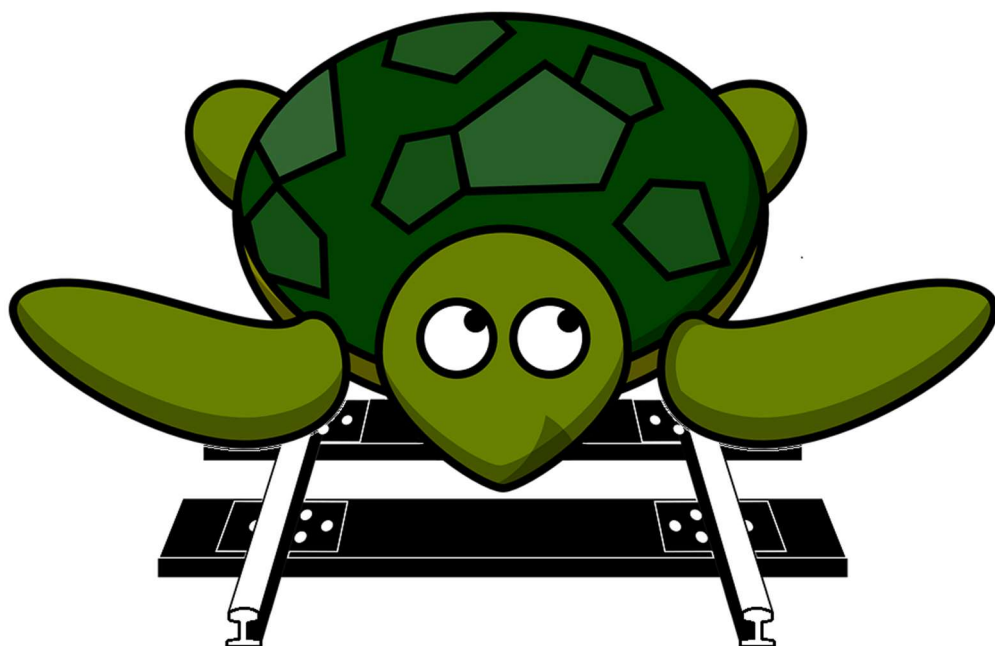


SBORNÍK STUDENTSKÉ VĚDECKÉ KONFERENCE ŽELEZNIČNÍ VÝZKUMNÉ AKTIVITY

5. ročník

19. – 20. ZÁŘÍ 2023

CHOCEŇ



ŽELVA 2023



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

Sborník příspěvků ŽELVA 2023

Studentská vědecká konference
Železniční výzkumné aktivity

5. ročník
19. – 20. září 2023
Choceň

GARANT KONFERENCE/SUPERVISOR
Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

EDITOR SBORNÍKU/EDITOR
Ing. Magdalena Křečková

PŘÍPRAVNÝ VÝBOR KONFERENCE/ORGANIZING COMMITTEE
Ing. Ondřej Bret
Ing. Magdalena Křečková

POŘADATEL
Katedra železničních staveb, Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 2077/7, Praha 6 – Dejvice, 166 29
<http://kzs.fsv.cvut.cz>
tel.: (+420) 224 355 460

Úvodní slovo

Vážené kolegyně, vážení kolegové,

dostává se Vám do rukou sborník z pátého ročníku konference ŽELVA (Železniční výzkumné aktivity), která se uskutečnila v termínu 19.-20. září 2023 v Chocni. Pět let existence této konference představuje nejen významný milník, ale také příležitost k reflexi našeho společného úsilí, pokroku a rozvoje.

ŽELVA, která se stala synonymem pro setkání odborníků zabývajících se železničními stavbami, si stále udržuje svou původní vizí – propojit znalosti, sdílet novinky a vytvářet prostor pro diskusi nad současnými výzvami, kterým čelíme.

Věřím, že si účastníci konference odnesli nové poznatky a inspiraci do další výzkumné činnosti či pro dokončení disertační či jiné kvalifikační práce.

Sborník, který máte nyní před sebou, je důkazem toho, jakým způsobem se naše komunita vyvíjí a rozšiřuje své obzory. Obsahuje bohatou škálu příspěvků, které reflektují šíři a hloubku našich zájmů a dovedností. Necht' v něm najdete inspiraci a podněty pro svou další práci.

Závěrem chci vyjádřit vděk všem, kteří se podíleli na přípravě konference – organizátorům, účastníkům a především autorům příspěvků, kteří přispěli k obohacení našeho odborného poznání.

Ing. **Leoš Horníček**, Ph.D.
Katedra železničních staveb
Fakulta stavební ČVUT

Obsah

Čížek, J. Optimální rozmístění a určení kapacity kolejí pro odstavení vlakových souprav	7
Bret, O. Vybrané detaily a řešení z tramvajových tratí zprovozněných v roce 2023	14
Horák, M.; Kuchár, M. Rychlost vlaků v kolejových spojeních a rozvětveních	22
Křečková, M. Bezстыková kolej na tramvajových mostech	36
Krejčí, J. Možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy	44
Lomoz, L. Digitální a zelená železniční infrastruktura Projekt DIGRI - Redukce hluku a vibrací	59
Pospíšil, J.; Lojda, V. Výsledky analýzy laboratorního vybavení na Fakultě stavební ČVUT v Praze za účelem výzkumu namáhání a deformace konstrukce vysokorychlostní železniční trati	66
Seidl, J. Analýza parametrů deformačních prvků tramvajů na následky nehod s auty	74
Šurovský, J.; Pasáková, D.; Lomoz, L. Akustická situace v okolí diskontinuit vegetačního krytu tramvajové trati	83
Vrba, J. Praktický pohled na přínosy technologie aktivního vedení dvojkolí u moderních článkových tramvajů	96

Optimální rozmístění a určení kapacit kolejí pro odstavení vlakových souprav

Ing. Jiří Čížek

*Fakulta dopravní ČVUT v Praze
Konviktská 20, Praha 1, 110 00
e-mail: cizekji4@fd.cvut.cz*

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou odstavení vlakových souprav. Nejprve popisuje všeobecně slabé stránky železniční dopravy. Následně vymezuje základní pojmy, které se v dané problematice vyskytují a částečně mapuje dotčenou legislativu. Popisuje dělení problematiky na dílčí části a určuje specifika těchto podtypů. Následně popisuje různé typy odstavných kapacit a jejich specifika, navrhuje systém jejich hodnocení. Vytváří tak úvodní analýzu jako podklad pro další rozvoj tohoto tématu, přičemž zároveň udává nástin dalšího postupu.

Klíčová slova

Železniční doprava, odstavení vozidel, kapacita dráhy, železniční infrastruktura

Optimal layout and capacity determination of railway staging yards

Abstract

This article focuses on railway rake staging problematics. Firstly, it describes weaknesses of railway transport in general. Next, it defines the terms used in the topic, and partially maps the connected legislative. It describes the classification of the topic and determines specific features of the types described. Subsequently, it describes various types of railway sidings used for staging and their features, then it suggests a rating method. It creates initial analysis of the topic and suggests the following steps.

Keywords

Rail transport, railway staging, railway capacity, rail infrastructure

1. Úvod

Železniční doprava je všeobecně považována za udržitelný způsob přepravy osob i nákladu. Zejména při přepravě nákladu o velkém objemu a na větší vzdálenosti může železnice plně rozvíjet své silné stránky, jakými jsou energetická efektivita a možnost bezemisní přepravy, relativně vysoká bezpečnost.

Koncepce nákladní dopravy pro období 2017-2023 s výhledem do roku 2030 [1] zmiňuje jako rizikové pro železniční nákladní dopravu mimo jiné tyto okruhy:

- Vyčerpaná kapacita pro nákladní vlaky na hlavních tratích
- Nedostatečné zohlednění potřeb pro nákladní dopravy při omezení kapacity – vliv výluk a mimořádností
- Koordinace řízení provozu v přeshraniční dopravě
- Požadavek dosažení parametrů interoperability dle TSI

Z celkem 10 okruhů jmenovaných v dokumentu se právě tyto 4 přímo či nepřímo dotýkají problematiky odstavení vlaků. Současný přístup k hospodaření s odstavnou kapacitou železniční dopravy je nejednotný, nelze z něj jednoduše definovat požadavky na kapacitu nově vznikající nebo modernizované infrastruktury a ta je tak následně nepřipravena na další rozvoj nákladní dopravy.

Tento příspěvek si klade za cíl popsat základní stavy, které se jak z infrastrukturního, tak provozního hlediska v dané problematice vyskytují. Další práce se budou věnovat výhradně dopravě nákladní, pro co nejkomplexnější přehled se však tento příspěvek zkoumá problematiku odstavů jako celek včetně osobní železniční dopravy.

2. Vymezení pojmů

Základním pojmem této problematiky je „odstav“, též „odstavení vlaku“. Zjednodušeně lze říci že se jedná o stav, kdy železniční vozidla nekonají přepravní funkci. V české legislativě nemá tento pojem přímou oporu. Legislativa však určuje rozdělení na odstav krátkodobý a dlouhodobý.

V dokumentu „Popis zařízení služeb Odstavné koleje“ vydaném Správou Železnic a účinném od 1. 5. 2019 [3] se uvádí následující: „Za krátkodobé technologické odstavení drážních vozidel se považuje krátkodobé odstavení drážních vozidel během obratu soupravy mezi jednotlivými plánovanými výkony nebo odstavení souprav během přepravního sedla mezi dvěma špičkami“, dále pak „Za krátkodobé provozní odstavení drážních vozidel se považuje krátkodobé odstavení drážních vozidel během přepravy, popř. před nebo po jízdě vlaku z provozních důvodů“. Pro oba tyto případy pak platí shodně horní hranice délky odstavu – 7 dní. Odstav, který neodpovídá ani jedné z těchto definic nebo nesplňuje časový limit, lze pak považovat za odstav dlouhodobý.

Pojem „dlouhodobý odstav“ není definován přímo, je pouze určeno že se jedná o každý odstav delší než 7 dní. Zároveň však ne každý odstav kratší než 7 dní lze považovat za krátkodobý.

Za odstav naopak nelze považovat stání soupravy během pobytu pro nástup/výstup a nakládku/vykládku, křižování, předjíždění, vyčkávání na přípoj u osobní dopravy, obrat soupravy atd. V těchto případech není splněna podmínka narušení přepravní funkce.

V předpisu SŽ D7 se dále uvádí následující: „Za odstavený vlak nebo soupravu se považuje vlak (souprava), který byl odstaven z důvodu propadu kapacity dráhy nebo jej za odstavený prohlásil dopravce.“ [6]

Pojmem „Kapacita dráhy“ se rozumí její využitelná průjezdnost umožňující rozvržení požadovaných tras vlaků na určitém úseku dráhy v určitém období. [5]

„Odstavná kolej“ je manipulační kolej určená k odstavování vozidel. Zároveň se také považuje za zařízení služeb. [5]

„Zařízením služeb“ se rozumí zařízení, které je jejich provozovatelem zvláště určeno k poskytování služeb bezprostředně souvisejících s provozováním drážní dopravy na dráze celostátní nebo regionální anebo na veřejně přístupné vlečce“. Tyto definice jsou ukotveny v předpisu D1 části první [4]

3. Rozdělení odstavů dle kritérií

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, odstavy lze dělit dle vícero kritérií na mnoho dalších podtypů. Následující část příspěvku popisuje různé přístupy k dělení odstavů a přibližně vysvětluje funkci jmenovaných typů.

3.1. Dělení dle času a důvodu odstavení

Základní dělení, které bylo zmíněno již v úvodu a zná ho i legislativa, je dělení dle doby odstavu. Hranice mezi krátkodobým a dlouhodobým odstavem však dle legislativy jasně nestanoví rozdíl v principech obou stavů. Časová hranice 7 dnů má význam spíše z hlediska stanovení způsobu přiřazení kapacity, než aby popisovala podstatu rozdílu mezi danými principy. Definici odstavu krátkodobého včetně dělení na provozní a technologický autor respektuje a níže uvádí komentář a příklady takových stavů.

Za krátkodobý odstav technologický tak, jak je definován výše, lze považovat veškeré pobyty vlaků osobní dopravy mezi vzbou jednotlivých spojů. Z hlediska osobní dopravy sem lze zařadit pobyt během nočního nebo poledního sedla, případně vyčkávání vozidel na připojení k jiným soupravám (přepřah, přibírání vozů). Neřadí se sem obrat soupravy, během kterého je souprava stále přístupná cestujícím. V takovém případě vlak nepřestává konat přepravní funkci. V nákladní dopravě do jisté míry odpovídá povaze technologického krátkodobého odstavu stání vozidel v průběhu procesu vlakotvorby.

Krátkodobý odstav provozní je dle definice způsoben provozními důvody. Může se jednat jak o důvody na straně provozovatele dráhy, tak na straně dopravce. Na straně provozovatele dráhy se zpravidla jedná o odstav z důvodu propadu kapacity dráhy, respektive vyčkávání na volnou kapacitu. Dále sem můžeme řadit vyčkávání na kapacitu vykládkového/nakládkového zařízení. Mezi důvody na straně dopravce spadá například výměna vlakové čety, procesy spjaté s povolením jízdy vlaku (zkouška brzdy), nebo procesy v pohraničních přechodových stanicích. [6]

Jak již bylo zmíněno výše, pojem dlouhodobý odstav není jasně definován. Lze sem teoreticky zařadit všechny situace, které nespádají do problematik popsaných výše. Jako rozhodující podmínku dlouhodobého odstavu lze stanovit, že na vlaku proběhlo zajištění vozidel proti ujetí stanovené předpisem D1, částí první, kapitolou 5. [4]

Do této kategorie lze zařadit odstav vozidel v době, kdy pro ně dopravce nemá žádné využití, tedy nejsou součástí soupravy jedoucí výchozí stanice do stanice koncové. Do této kategorie dále řadíme také soupravy odstavené z důvodu závad na vlacích či na infrastruktuře, které v dané situaci nemohou v jízdě pokračovat. Zvláštní situací je odstav za účelem funkce nesouvisející s drážní dopravou, tato problematika je popsána níže.

3.2. Dělení dle přidružené funkce

Odstavy lze dále zatřídit dle přidružené funkce, která při nich může probíhat. Základním stavem je odstav prostý, tedy odstavení soupravy bez dalších doprovodných činností.

Typickou přidruženou funkcí je dobíjení trakční energie akumulátorových vozidel, které jím jsou vybaveny. Lze sem zařadit i další procesy související s jízdou vlaku, například zkoušku brzdy nebo pro.

Na soupravách osobní dopravy může být v době jejich odstavení prováděna zběžná údržba, úklid nebo zbrojení. Specifickým případem je vytápění vozidel, a to jak z topného stojanu, tak z hnacího vozidla.

Odstavená souprava dále může během pobytu konat i jiné funkce, které nesouvisí přímo s železniční dopravou. Odstavené osobní vozy mohou sloužit k ubytování, ložené nákladní vozy mohou plnit funkci pojízdného skladu, další možností je například provoz pojízdných výstav. Lze sem zařadit také využívání hnacího vozidla pojízdného zdroje energie. Takovéto využití vozidel může ve velké míře přispívat ke zhodnocování majetku dopravců a zefektivňování železniční dopravy obecně.

4. Odstavné kapacity

Klíčovým prvkem realizace odstavného procesu je infrastruktura, na níž se má uskutečnit. Aby bylo možné s její kapacitou efektivně hospodařit, je nezbytné znát a vyhodnocovat jak konkrétní řešení jednotlivých lokalit, tak jejich vzájemné umístění na síti.

4.1. Lokalizace kapacit na síti

V současnosti nejrozšířenější variantou je umístování odstavných kapacit do mezilehlých dopravních s kolejevým rozvětvením. Při nevyčerpané kapacitě předjízdnych kolejí pro jejich původní účel lze některé z nich využívat jako odstavné. Taková odstavná kapacita má obvykle malý rozsah, jedná se o maximálně nižší jednotky kolejí. Jejich délka je navíc omezena délkou stanic, která jen vzácně dosahuje hodnot stanovených TSI INF CR (pro síť TEN-T spadající do kategorie F1 je tato hodnota minimálně 740 m) [2]. Výhodou takového umístění je velké a poměrně rovnoměrné rozprostření po síti. Dále je nutné brát na vědomí, že tyto kapacity zpravidla nevznikly pro tento účel, a tudíž nelze vyloučit, že některé bude v budoucnu nutné přestat jako odstavné využívat.

Kapacity v uzlech naopak vznikly zpravidla primárně pro tento účel. Jedná se o samostatné skupiny kolejí vybavené dostatečnou navazující infrastrukturou a většími kolejevými kapacitami o dostatečné délce. Typickým doprovodným jevem je pak vznik dalšího provozního zázemí, například dep či opraven vozů v takových lokalitách. Nevýhodou takových lokalit je zatěžování uzlů zastavujícími vlaky jedoucími nízkou rychlostí přes úzká hrdla.

Další možností, která se v našem prostředí v současnosti nevyskytuje, je využívání vícekolejných úseků. Tato varianta je využitelná pro krátkodobé odstavy, například při odstavení vlaku v době špičky, kdy je kapacita dráhy v navazujících úsecích vyčerpána. Pro dlouhodobé odstavy je zcela nevhodná z důvodů problematického zajištění bezpečnosti, chybějící doprovodné infrastruktury a blokování kapacity dráhy určené pro jiné účely.

Soupravy lze dále odstavovat také na vlečkách. Vlečkař může tímto způsobem odstavovat vlastní vozy, nebo pronajímat své nevyužité kapacity jiným dopravcům a tím takovou kapacitu finančně zhodnotit. Toto řešení je poměrně málo zmapováno vzhledem k tomu, že do něj nijak nezasahuje státní správce infrastruktury. Lze však předpokládat, že se jedná o přístup běžný a velmi rozsáhlý. Za vlečku mohou v tomto případě být považována i depa osobních dopravců

Speciálním případem je dlouhodobé odstavování souprav v nevyužitých kapacitách seřaďovacích stanic. Ty obvykle disponují velkým množstvím kolejí o relativně velké délce. Jejich další výhodou je obvykle kvalitní návazná infrastruktura. Vzhledem k jejich proměnlivé vytíženosti lze zbytkovou kapacitu k odstavům využít. Tomu nahrává také trend úpadku systému jednotlivých vozových zásilek, který je na seřaďovací stanice primárně vázán [1]. Existuje

zde, podobně jako u odstavů v mezilehlých dopravních, riziko vytlačení tohoto druhotného využití původním či jiným účelem.

4.2. Parametry kapacit a jejich hodnocení

Aby bylo možné odstavné kapacity objektivně posuzovat, je nejprve nutné stanovit parametry, které se mají za tímto účelem sledovat, případně při vytváření nové infrastruktury mají tyto parametry umožnit jednotně dimenzovat rozsah takových kapacit. Na základě určených parametrů bude následně možné infrastrukturu hodnotit. Autor navrhuje sledovat za účelem hodnocení kapacity následující parametry:

- počet kolejí ve zkoumané lokalitě
- délka kolejí ve zkoumané lokalitě
- užití zabezpečovací zařízení v dopravně, respektive odpovídající technologické časy

Další parametry pak s kapacitou přímo nesouvisí, ale mohou rovněž mít na posuzování dané lokality vliv:

- vybavenost kolejí trakčním vedením
- nejvyšší dovolená rychlost v odstavných a přilehlých kolejích
- dopravní program zkoumané dopravy

V současnosti v českém prostředí není žádná metodika hodnocení odstavných kapacit není zavedena. Autor předpokládá, že v rámci dalšího rozvoje tématu bude na základě výše jmenovaných parametrů utvářet metodiku hodnocení, kterou aplikuje do celkového výsledného nástroje.

Odstavné lokality následně lze charakterizovat také ukazateli nedopravního charakteru, doprovodnou vybaveností. Sem lze zařadit zejména vybavenost zázemím pro personál dopravců, nebo také návaznou infrastrukturu, například dostupnost návaznou dopravou umožňující zaměstnancům dopravit se k odstavným kapacitám z místa nástupu do služby atd. Autor nepředpokládá, že by se takováto návazná infrastruktura do hodnocení konkrétních lokalit promítla, neboť v rámci odstavné lokality jako celku se jedná o relativně málo významnou a také poměrně flexibilní položku.

5. Závěr

Cílem příspěvku je nastavit základní rámec v problematice odstavů vlaků, popsat proces odstavování z hlediska jeho účelu a zatřídít jednotlivé typy odstavu do určených kategorií. Příspěvek se dále také věnuje problematice infrastruktury, která se pro odstavování vozidel používá.

Autor předpokládá následující postup. Bude navržena metodika pro hodnocení odstavných kapacit. Zároveň bude více rozpracováno zatřídění jednotlivých druhů odstavu a bude blíže určeno, kterým z nich se další postup bude věnovat. Cílem je vytvoření optimalizačního algoritmu, který na zadané síti nadefinuje kritické lokality a navrhne rozmístění a velikost odstavných kapacit tak, aby byl provoz na takové síti co nejstabilnější.

Literatura

- [1] KONCEPCE NÁKLADNÍ DOPRAVY PRO OBDOBÍ 2017–2023 S VÝHLEDEM DO ROKU 2030. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2017.
- [2] Příručka pro používání TSI infrastruktura. Valenciennes: Evropská agentura pro železnice, 2015.
- [3] Popis zařízení služeb Odstavné koleje ve znění změny č. 3 účinné od 15.1.2020. Praha: Správa železnic, 2020.
- [4] SŽ D1 ČÁST PRVNÍ Dopravní a návěstní předpis pro tratě nevybavené evropským vlakovým zabezpečovačem. Praha: Správa železnic, 2022.
- [5] Zákon č. 266/1994 Sb.: Zákon o dráhách.
- [6] SŽDC D7 Předpis pro operativní řízení provozu. Praha: SŽDC, 2014.

Vybrané detaily a řešení z tramvajových tratí zprovozněných v roce 2023

Ing. Ondřej Bret

*Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6 /
/ Metroprojekt Praha a.s., Argentinská 36, 170 00. Praha 7*

e-mail_1: ondrej.bret@fsv.cvut.cz,

e-mail_2: ondrej.bret@metroprojekt.cz

Abstrakt

Příspěvek stručně přibližuje některé nové nebo zajímavé detaily technického řešení na tramvajových tratích dokončených a zprovozněných v letošním roce 2023.

Klíčová slova

Tramvajové tratě, zab-zař, příslušenství TT

Technical details and solutions on the tram tracks completed in 2023

Abstract

Text briefly describes some new or interesting details of the technical solution on the tram tracks completed and put into operation this year, 2023.

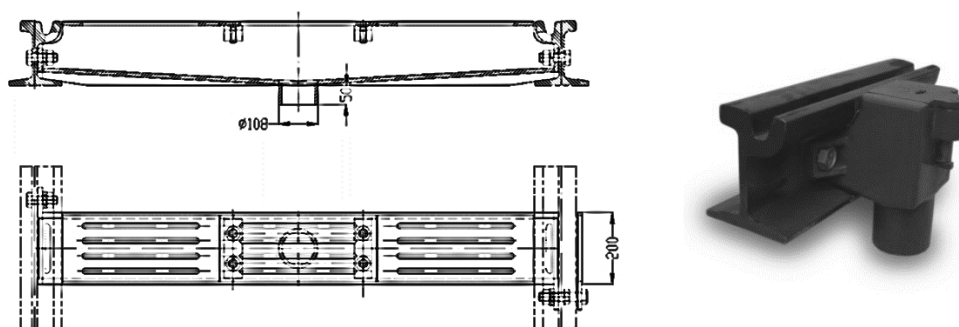
Keywords

Tram tracks, accessories od tram tracks

1. Dělené kolejové odvodňovače

Kolejový odvodňovač je standardní součást vybavení tramvajové tratě zajišťující odvod vody z prostoru koleje v určených místech tramvajové tratě, zpravidla v údolnicovém oblouku a dále v definovaných místech.

Rozlišujeme dvě standardní provedení odvodňovačů – (1) kolejový prahový odvodňovač, kde mimo žlábků kolejnic je pomocí prahové vpusti odvodněn i prostor koleje (v základu v mezirozchodu, s možným doplněním o odvodnění i další části zákrytu) a dále (2) kolejnicový odvodňovač, tzv „krabičku“, která odvodňuje výhradně žlábek žlábkových kolejnic. Výhodou kolejového odvodňovače je jeho větší kapacita, nevýhodou ale jsou vyšší nároky na údržbu, zvláště při přejíždění vozidly nekolejové dopravy. U kolejnicových odvodňovačů jsou vlastnosti opačné – nevýhodou je menší kapacita, avšak výhodou je větší stabilita osazení v koleji. Oba druhy odvodňovačů jsou vyobrazeny níže na obrázku 1.



Obr. 1. Kolejový prahový odvodňovač (vlevo) a kolejnicový odvodňovač „krabička“ v provedení od výrobce Pražská Strojírna a.s. (vpravo)

Kolejové odvodňovače se typicky využívají v úsecích s pojižděným zákrytem, kolejnicové odvodňovače pak v úsecích se žlábkovou kolejnicí bez zákrytu, nebo zákrytem vegetačním.

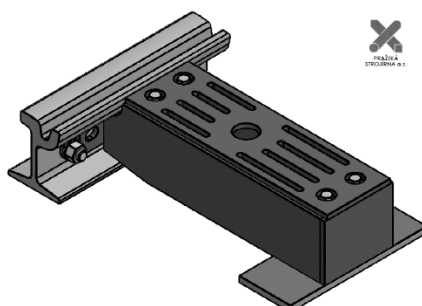
Nové omezující podmínky pro umístění odvodnění tramvajových tratí nastávají u tratí se zabezpečením provozu pomocí zabezpečovacího zařízení založeného na funkci kolejových obvodů.

Funkce tohoto zabezpečovacího zařízení je založena na rozizolování koleje na jednotlivé obvody, po jejichž délce nemohou být kolejnice vzájemně vodivě propojeny. Mimo jiné aspekty, které použití tohoto zabezpečovacího zařízení má (za všechny je pro tramvajové tratě možné uvést vynuceně větší vzdálenost kabelových kolejnicových propojů, nebo nemožnost použití rozchodnic) dopadá toto omezení i na kolejové odvodňovače. Využití standardních kolejových prahových odvodňovačů je v takových úsecích vyloučeno.

Tuto problematiku bylo nutné jako na jedné z prvních tramvajových tratí řešit na přeložce TT Žabovřeská, která byla vyvolána výstavbou Velkého městského okruhu v Brně. Tramvajová trať vedoucí v údolí řeky Svratky zde byla v délce 1113 m rekonstruována a přeložena, a to včetně 500 m dlouhého tramvajového tunelu. Právě umístění v tunelu, a v neposlední řadě i na přilehlých úsecích na předportálech, s rozhledem omezeným samotným tunelem, zárubními zdmi a protihlukovými stěnami, vynutilo umístění zab-zař pomocí kolejových obvodů.

Tím, že zabezpečený úsek zasahuje i mimo tunel, bylo nutné řešit i povrchové odvodnění tratě – využití kolejových odvodňovačů. S ohledem na odvodňované plochy a další požadavky bylo zvoleno využití kapacitnějších kolejových odvodňovačů (1), ne pouze odvodňovačů kolejnicových (2).

Zvažováno bylo více řešení – odvodňovače kompozitní i plastové – z vícero důvodů, z čehož hlavním aspekty byly funkčnost a trvanlivost, byl zvolen atypický dělený kolejový odvodňovač vyvinutý v Pražské Strojírně a.s.



Obr. 2. Dělený kolejový odvodňovač výrobce Pražská Strojírna a.s.

Toto řešení se ukázalo jak pro realizaci a usazení, tak pro funkčnost kolejových obvodů jako funkční, a od května 2023 slouží k odvodnění tratě na zprovozněné přeložce TT Žabovřeská.



Obr. 3. Dělený kolejový odvodňovač užitý v trati se zákrytem [L.P.]

2. Kabelové trasy v přerušovaných multikanálech

V souvislosti s rozvojem a nárůstem počtu všech informačních, zabezpečovacích a dalších systémů souvisejících s provozem tramvajových tratí (napájecí kabely, sdělovací kabely pro „EIP“, kamerové systémy a další, sítě NN, ...) narůstá i nutný počet kabelových tras vedoucích podél tramvajových tratí.

Nejinak tomu je u prodloužení trati (Barrandov –) Holyně – Slivenec, s termínem zprovoznění v říjnu 2023, která je navržena v předstihu před developerskou zástavbou, na zcela novém zemním samostatném tělese.

Jako nejvhodnější řešení byla navržena a je realizována kabelová trasa v přerušovaném multikanálu. V úseku Holyně – Slivenec je proto přímo v tělese tramvajové trati integrována dvojice devíti-kanálových multikanálů, které jsou vždy realizovány v délce 40 m, po kterých následuje 5 m dlouhé přerušení písčivým ložem, které umožňuje dodatečné protažení dalších případně doplňovaných sítí. Celé řešení je velmi dobře patrné na obrázku 4.



Obr. 4. Kabelová trasa v místě přerušení multikanálu [K.O.]

Jako opatření proti rozvolňování kolejového lože jsou v místě přerušení multikanálu umístěny L prefabrikáty.

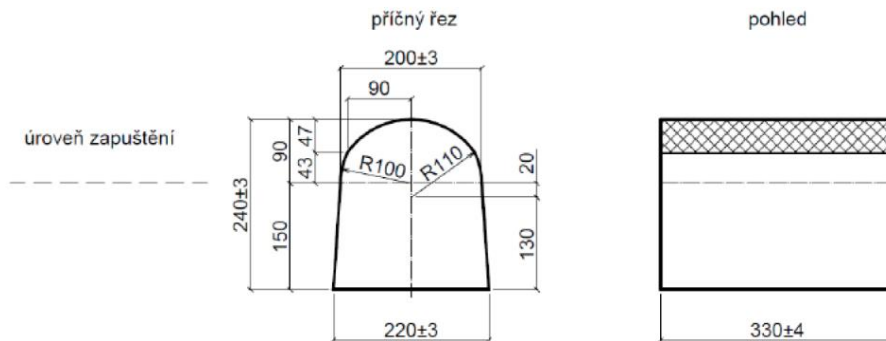
V místě zastávek jsou pak místo přerušování multikanálu využity standardní systémové kabelové komory pro snadnější přístup a jednoduchou možnost doplňování nových kabelových tras.

3. Inovativní přístupy k preferenci tramvajové dopravy a segregaci koleje od silniční dopravy

Další zajímavá řešení, která stojí za povšimnutí a která dosud jinde nebyla použita, můžeme nalézt na další pražské trati s termínem zprovoznění v říjnu 2023: Divoká Šárka – Dědina. Jedná se o preferenční opatření pro segregaci tramvajové trati v úrovni vozovky, respektive vedoucí paralelně se silniční dopravou v přilehlém pruhu.

3.1. Podélný oddělovací práh tvořený „žulovým bumlíkem“

Pro segregaci tramvajové koleje od silniční dopravy známe vícero způsobu. (Nejen) v Praze hojně rozšířeným a známým řešením je použití podélného prahu tvořeného z prefabrikovaných tvarovek známých jako „bumlíky“.



Obr. 5. Rozměrový náčrt oddělovací tvarovky [ČSN 28 0318].

V případě prodloužení tramvajové trati z obratiště Divoká Šárka skrz sídliště Na Dědině byla při návrhu dbána zvláštní pozornost i estetické stránce řešení. Mimo další aspekty, jako je výsadba nové aleje v ose os, vegetační zákryt TT, nebo citlivá volbu všech povrchů a to jak chodníkových, tak vozovek, bylo jedním s důsledně dodržovaných požadavků i využívání všech uličních obrub kamenných, nikoli betonových.

V tomto duchu bylo tedy přistoupeno i k řešení 62 m dlouhého podélného oddělovacího prahu v blízkosti křižovatky Vlastina – Drnovská.

Jako řešení shodného účelu jako prefabrikovaná tvarovka bylo navrženo opracování kamenné obruby OP4 s fazetováním. Ukosení horních hran bylo zvoleno 70 mm, výsledná obruba tak má základnu (šířku) 20 cm, výšku 25 cm, a po provedení fazet horní plochu šířky 6 cm.

Zapuštění obruby bylo zvoleno shodně s tvarovkou dle ČSN 28 0318 – horní povrch je umístěn 9 cm nad povrchem přilehlé vozovky, což umožní nouzové přejíždění vozidel.

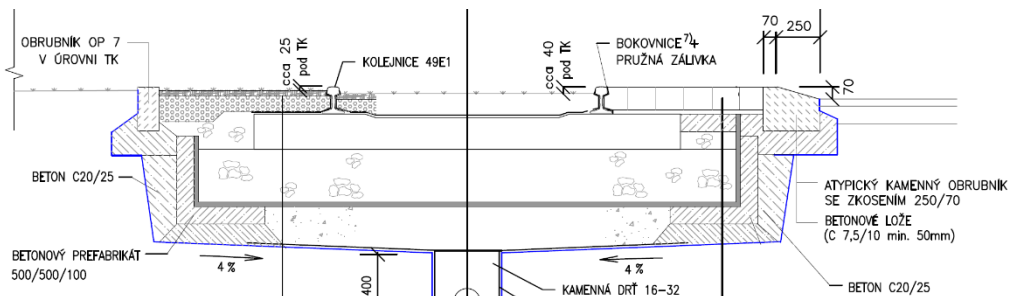


Obr. 6. Opracovaná kamenná obruba OP4 s fazetou 7x7 cm použitá jako podélný oddělovací práh

3.1. Podélný oddělovací prah tvořený „žulovým bumlíkem“

Na stejné tramvajové trati (Divoká Šárka – Dědina) můžeme najít i další zajímavé řešení souběhu tramvajové koleje a přilehlé vozovky, a to shodou okolností také ve Vlastině ulici. Jedná se částečně zatravněný, částečně pojízditelný kryt tramvajové koleje, která oproti vozovce navíc mírně vyvýšena.

Níže popsané řešení vychází z prostorových možností a poměrů ve Vlastině ulici, které byly limitovány jak polohou stávající vozovky, tak zachovávaného (původně krajního) stromořadí (které je po dobudování severní vozovky nově aleji středovou). Šířka jižní vozovky (nově jednosměrná pro dopravu směrem z centra) je zde 4,25 m. Z důvodu možnosti objíždění nepojízdných vozidel a možnosti průjezdu vozidel IZS i při větší hustotě provozu je navrženo provedení částečně pojízditelné koleje, které toto objíždění při nedostatečné šířce vozovky umožňuje.



Obr. 7. Příčný řez v místě částečně pojízditelného zákrytu

Na obrázku 7 je možné si povšimnout i částečnému vyvýšení nad okolní vozovku, které činí 70 mm, a je provedena atypickou kamennou opracovanou obrubou. Tato hodnota vyvýšení vychází z normativních požadavků tak, aby bylo možné tento prostor v případě potřeby využívat silničními vozidly a nejednalo se o zvýšený tramvajový pás. V době sepisování příspěvku nebylo ještě provedeno zatravnění, konečné řešení je však představitelné z obrázku 8.



Obr. 8. Pohled na kolej s částečně pojízditelným zákrytem vně kolejnice [T.P.]

Literatura, zdroje a odkazy

- [1] Pražská strojírna a.s., <http://pstroj.cz>
- [2] Metroprojekt Praha a.s, <http://metroprojekt.cz>
- [3] SITEL spol.s r.o., <http://sitel.cz> -> Katalog - Multikanály
- [4] ČSN 28 0318 – Průjezdne průřezy tramvajových tratí a obrisy pro vozidla provozovaná na tramvajových drahách, březen 2015, ÚNMZ.

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován za podpory mých kolegů a spolupracovníků, kteří poskytli některé použité fotografie, a dále mých blízkých, kterým děkuji za poskytnutou podporu a trpělivost.

Rychlost vlaků v kolejových spojeních a rozvětveních

Ing. Matouš Horák¹, Ing. Martin Kuchár²

Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 331/95, 602 00 Brno

e-mail_1: Matous.Horak1@vutbr.cz,

e-mail_2: Martin.Kuchar1@vut.cz

Abstrakt

Práce je zaměřena na rychlost vlaků, primárně v železničních stanicích. Zabývá se též parametry, na kterých rychlost závisí, např. Vliv zabezpečovacího zařízení, nebo trakčních vlastností vozidel. V rámci praktické části bylo provedeno přímé měření rychlostí ve vhodných lokalitách a dále modelování těchto situací v programu OpenTrack, v závěru práce bylo provedeno srovnání obou metod.

Klíčová slova

Rychlost, zrychlení, trakční charakteristiky, kolejová rozvětvení.

TRAINS´ SPEED IN SWITCHES AND CROSSINGS

Abstract

The work is focused on the speed of trains, primarily in railway stations. It also deals with the parameters on which the speed depends, for example the influence of the safety device or the traction characteristics of the vehicles. As part of the practical part, a direct measurement of speeds in suitable locations was carried out, as well as modeling of these situations in the OpenTrack program, at the end of the work a comparison of both methods was carried out.

Keywords

Speed, acceleration, traction characteristics, track junctions.

1. Úvod

Oproti situaci na širé trati, kdy je rychlost vlaku ovlivněna zejména GPK a je většinou konstantní, v železničních stanicích je závislá na více kritériích. Shodně s širou tratí se zde projevuje vliv odstředivé síly při průjezdu obloukem, zejména v odbočných větví výhybek (obzvláště, když se výhybky většinou zřizují bez převýšení), nicméně se zde výrazněji projevuje i vliv zabezpečovacího zařízení, například zaváděného ETCS L2.

V současné době navíc panuje snaha o zavádění co nejvyšších rychlostí v předjízdých kolejích. Je tedy otázkou, zda jsou těchto rychlostí vlaky schopny využít.

2. Cíle práce

Cílem práce je zjistit rychlosti, kterých dosahují vlaky v železničních stanicích při průjezdu přes kolejová spojení.

Tohoto cíle se dosáhne realizací měření a vyhodnocením měření rychlosti vlaků v železniční stanici.

První metodou je přímé měření rychlosti vlaků v dané lokalitě. Bude zvoleno vhodné stanoviště, odkud bude měření prováděno. Součástí této části bude i výběr vhodné metody měření.

V druhé části bude provedena simulace v programu OpenTrack. Tato část bude obsahovat sestavení modelu a provedení simulace, ale také optimální nastavení tak, aby výsledky reflektovaly reálný stav.

Na závěr bude provedeno srovnání výsledků získaných oběma metodami.

Cílem je ověřit, zda jsou rychlosti v předjízdých kolejích využitelné, nebo naopak železniční infrastruktura není limitujícím prvkem. Porovnání přímého měření se simulací je vhodné pro ověření, zda jsou simulační programy využitelné pro rozhodnutí o typech výhybek a rychlostech v nich při návrhu zhlaví železničních stanic.

3. Výběr lokalit

Železniční stanice byly vybrány tak, aby v nich docházelo k pravidelnému vjezdu/odjezdu vlaků do/z předjízdých kolejí. Současně byly voleny tak, aby byla rychlost v předjízdých kolejích vyšší než obvyklých 50 km/h.

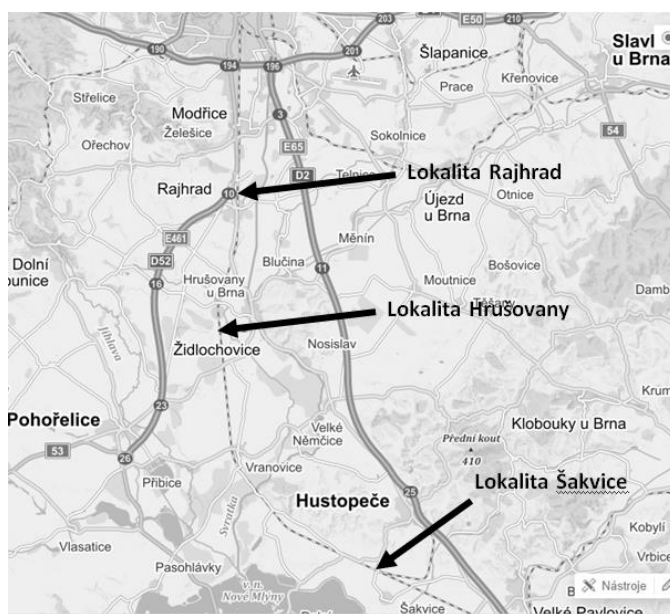
Dalším kritériem byl provoz vozidel s rozdílnými trakčními vlastnostmi, u nichž bude možnost porovnávat techniku rozjezdu.

První fáze měření byla zaměřena jen na osobní vlaky. Výhodou tohoto řešení je zejména větší objem dat. Ve vybraných stanicích je u osobních vlaků zaveden hodinový, ve špičkách pracovních dnů dokonce půlhodinový, takt. Mimo to je jednodušší i organizace měření, největší objem osobní dopravy se odehrává během ranních a odpoledních hodin, tedy s dobrou dostupností. Oproti tomu nákladní doprava je nejsilnější v nočních hodinách. U nákladní dopravy je také obtížné predikovat předjíždění v konkrétní stanici. Pro výběr

vlaků osobní dopravy mluvil i fakt, že je dostupné řazení souprav, tedy i hmotnost, která poté vstupuje do simulace.

Výslednými lokalitami jsou žst. Šakvice a žst. Hrušovany u Brna. Posléze byla přidána i lokalita v blízkosti odb. Rajhrad.

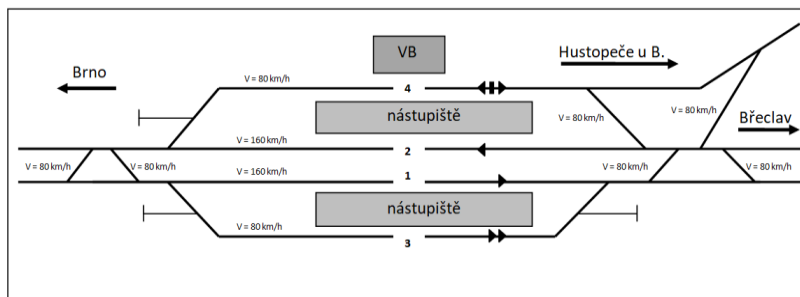
Všechny lokality leží na trati Brno – Břeclav, z této celostátní dráhy ve stanicích Hrušovany u Brna a Šakvice odbočují regionální dráhy do Židlochovic a Hustopečí u Brna. Osobní vlaky jsou vedeny z Brna do Židlochovic a Hustopečí v hodinovém taktu (ve špičkách pracovních dnů v půlhodinovém) ve vzájemném prokladu. Kromě toho je trať zatížena dálkovou dopravou, a to jak osobní, tak nákladní. Rychlíky Brno – Břeclav – Olomouc zastavují ve stanicích Šakvice, Zaječí a Podivín, ostatní dálkové spoje projíždějí mezi Brnem a Břeclaví všechny stanice. Schéma vybraných lokalit znázorňuje Obr. 1.



Obr. 1 - Schéma vybraných lokalit

2.1. Šakvice

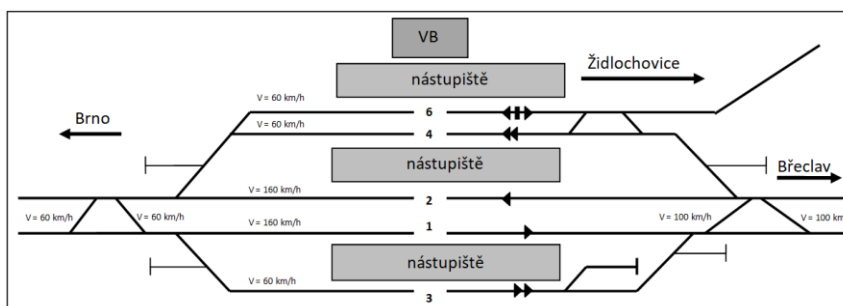
První lokalitou je železniční stanice Šakvice. Jedná se o odbočnou železniční stanici, leží na celostátní dráze Brno – Břeclav a odbočuje z ní regionální dráha Šakvice – Hustopeče u Brna. Dopravní schéma stanice znázorňuje Obr. 2.



Obr. 2 - Dopravní schéma žst. Šakvice

2.2. Hrušovany u Brna

Druhou lokalitou je železniční stanice Hrušovany u Brna. Jedná se o odbočnou železniční stanici, leží na celostátní dráze Brno – Břeclav a odbočuje z ní regionální dráha Hrušovany u Brna – Židlochovice. Dopravní schéma stanice znázorňuje Obr. 3.



Obr. 3 - Dopravní schéma žst. Hrušovany u Brna

2.3. Rajhrad

Poslední lokalitou je okolí odbočky Rajhrad. Tato lokalita byla vybrána dodatečně. Hlavním důvodem bylo zachycení rozjezdů/brzdění vlaků do zastávky na širé trati. Zatímco ve stanici jsou vlaky omežovány rychlostí do odbočné větve výhybky, na širé trati se rozjíždí na traťovou rychlost. Ta v tomto případě činí 160 km/h.

3. Soupravy

Osobní vlaky do Hustopečí jsou tvořeny lokomotivou řady 242 nebo 263 a osobními vozy řady Bdtmee. Většina souprav je tvořena čtyřmi osobními vozy uvedené řady, jedna třemi a jedna pěti. Tyto soupravy pro účely měření představují starší generaci vozidel. Novou generaci představují zejména jednotky řad 550, 660 a 640.

Osobní vlaky z/do Židlochovic jsou vedeny buď elektrickými jednotkami, a to buď dvojití řady 550, nebo samostatnou 640, nebo vratnou soupravou s lokomotivou řady 242 nebo 362. Od letní změny jízdních řádů jsou všechny osobní vlaky vedeny elektrickými jednotkami řad 530 a 550

4. Přímé měření

Původním předpokladem bylo osazení stabilních Měřičů rychlosti kolejových vozidel (dále jen „radar“) a fotografického záznamového zařízení. Předpoklad délky měření byl týden (tj. včetně nepracovních dní). Pro vhodné umístění jsem místo navštívil a provedl zkušební měření. Důvodem bylo jednak nalezení vhodného umístění, tj. aby místo měření nebylo ovlivněno stíněním např. protihlukovou bariérou nebo stožáry trakčního vedení. Dalším důvodem bylo také seznámení se s provozem, tj. ze kterých kolejí příslušné vlaky odjíždějí, kde zastavují, zda na konci nástupiště, nebo uprostřed (nejblíže přístupu na nástupiště). Po zkušebním měření jsem dospěl ke změně metody.

Výhodou měření stabilním radarem je velký objem získaných dat, navíc v delším časovém období, tj. umožňuje zachytit například změnu v nepracovní dny, nebo provoz nákladních vlaků v nočních hodinách, což se jeví velmi výhodné v předchozí práci, kde bylo rozhodující zaznamenat všechny kategorie projíždějících vlaků, navíc v co nejvyšších počtech a z nich analyzovat průměrné hodnoty, které by byly zatíženy, co nejmenší chybou. Oproti tomu, v tomto případě byly rozhodující pouze některé kategorie vlaků, ovšem s určitými specifiky. Stabilní radar zaznamená více hodnot ke každému průjezdu, ovšem tyto hodnoty nelze přiřadit k přesnému místu, navíc množství hodnot závisí na více faktorech (drsnot odrazné plochy, členitost povrchu, úhel, pod kterým paprsek dopadá) a nelze je predikovat. Výsledkem tohoto měření by tedy byly rostoucí, resp. klesající hodnoty rychlostí, které by ovšem nebylo možné přiřadit k daným místům a sestavit závislost rychlosti na ujeté dráze.

S přihlédnutím k těmto okolnostem jsem přistoupil ke změně metody sběru dat. Výslednou metodou je tedy nakonec měření ručním radarem v předem určených místech, schéma jednotlivých míst je uvedeno u jednotlivých lokalit. Výhodou tohoto přístupu je jednoduchost a nenáročnost na vybavení, resp. snadná úprava např. měřených míst a to v podstatě okamžitě. Další výhodou je i rychlá odezva a sledování dalších parametrů, např. délka souprav a místo zastavení, jejichž vyhodnocování ze záznamového zařízení by bylo velmi obtížné, nebo nemožné.

Mezi nevýhody tohoto přístupu patří zejména omezené množství dat. Měření vyžaduje přítomnost osoby po celou dobu měření, což vzhledem k nepříznivým atmosférickým podmínkám (měření probíhalo v prosinci) omezuje délku jednoho měření na dvě až čtyři hodiny, což zejména v lokalitě Šakvice neposkytuje potřebné množství dat. Měření bylo nutné tedy opakovat. Další obtíže plynou z faktu, že hodnoty jsou zaznamenávány ručně, tj. vznikají chyby dané nedokonalostí lidských smyslů. Jedná se zejména o odhadnutí okamžiku, kdy čelo vlaku mine daný bod, zejména u vzdálenějších bodů, jako pomůcka v tomto případě byly proto voleny body u snadno rozeznatelných bodů (návěstidlo, začátek výhybky, srdcovka výhybky).

K měření byl použit ruční radar Bushnell Speed Radar Gun, model 101911, výrobní číslo 001000250755-0000. Dle výrobce je schopen měřit hodnoty rychlosti v intervalu 17 – 322 km/h na maximální vzdálenost 457 m. Rozsah teplot je od 0 do 40 °C. Výrobce udává chybu měření je ± 2 km/h.

S přihlédnutím k uvedeným skutečnostem bylo vyhodnoceno jako nejlepší řešení umístění stabilních měřičů buď ve formě indukční smyčky, nebo snímače na bázi piezoelementu na daná místa, případně doplněný fotografickým zařízením. Toto řešení jednak umožňuje přesnou lokalizaci vlaku, tj. odpadájí problémy s určováním polohy, jednak umožňuje osazení do více míst, navíc optimálně rozložených. Při měření ručním radarem byl totiž výběr bodů ovlivněn viditelností ze stanoviště (které navíc muselo být umístěno mimo průjezdný průřez), dalším limitujícím prvkem byla vzdálenost od stanoviště. Snímače v koleji by takto nebyly limitovány. Tento způsob měření by navíc umožňoval sběr velkého množství dat po delší dobu, tj. bez nutnosti přítomnosti obsluhy. Další výhodou je i měření hmotnosti, což by výrazně zpřesnilo simulaci rozjezdů nákladních vlaků. V předchozí práci byla totiž hmotnost pevně stanovena, přitom právě u nákladních vlaků hmotnost hraje při rozjezdu rozhodující roli.

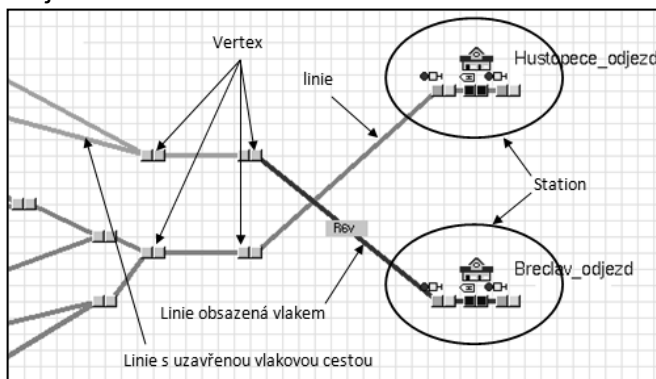
Nevýhodou tohoto řešení je časová i finanční náročnost výroby potřebných snímačů, proto jej nebylo možné použít pro řešení této práce.

5. Simulace

Další částí práce bylo vytvoření simulací. K tomuto účelu byl využit program OpenTrack. Tento program není určen primárně k detailnímu simulování chování vozidla, ale k modelování grafikonu – propustnosti železniční sítě. Práce se tedy bude dále zabývat tím, zda je v tomto programu možné vytvořit odpovídající model a zda výsledky simulace korespondují s výsledky přímého měření, případně objasnit příčiny odchylek.

5.1. Popis simulačního programu

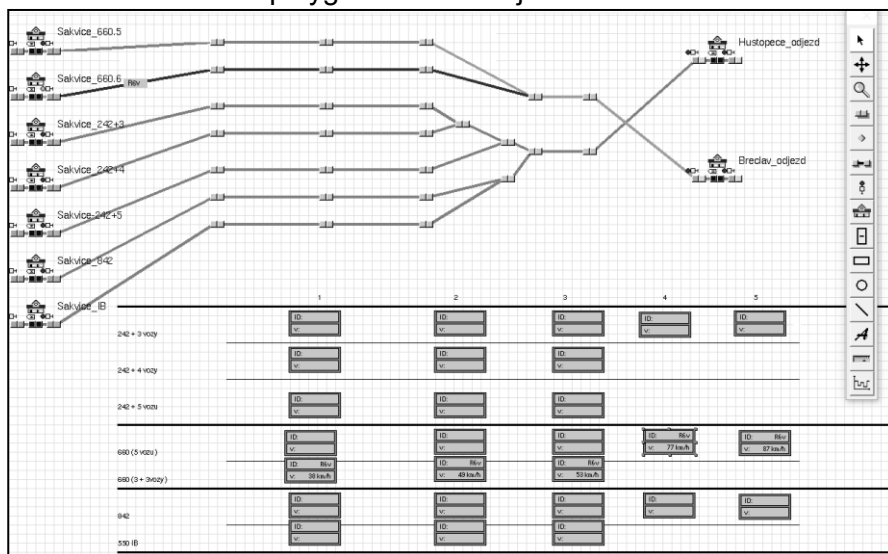
Základním prvkem je *Vertex*, entita, které lze přiřadit staničení. Je rozdělený na dvě poloviny „vjezdovou“ a „odjezdovou“. Prvky se spojují liniemi. Těm se přiřazuje délka (z rozdílu staničení), maximální rychlost, poloměr a stoupání, poslední dva uvedené parametry slouží k výpočtu jízdnic odporů. Do jednoho prvku smí ústít maximálně dvě linie do vjezdové části a mohou z něj vycházet maximálně dvě linie z odjezdové části. Grafické zobrazení je pouze schematické, tj. například zobrazení linií není nijak vázáno na zadanou délku. Příklad znázorňuje Obr. 4.



Obr. 4 - Ukázka grafického znázornění v

Z těchto prvků se skládá trať, *Route*, na níž se poté vytváří vlakové cesty, *Path*. Trať neodpovídá přesnému schématu stanice, je to vlastně soubor variant vlakových cest s danými parametry. Vlaková cesta musí začínat a končit prvkem *Station*, stanice. Tato stanice není stanicí v dopravním významu, ale buď výchozí nebo koncový bod vlakové cesty, nebo místo zastavení, tj. konec nástupiště nebo návěstidlo.

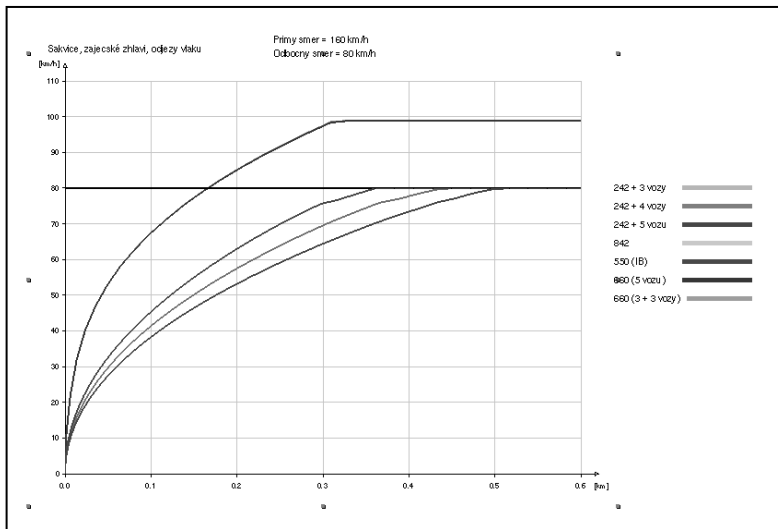
Na takto sestavené trati již lze vytvořit *Courses/Services*, spoje, jímž lze přiřadit *Timetable*, jízdní řád, v němž lze nastavit např. zastavení v určité stanici. Dále je nutné přiřadit spoji *Train*, soupravu. Instalace programu OpenTrack, v níž byla simulace prováděna, obsahovala knihovnu českých hnacích vozidel. Ukázku polygonu znázorňuje Obr. 5.



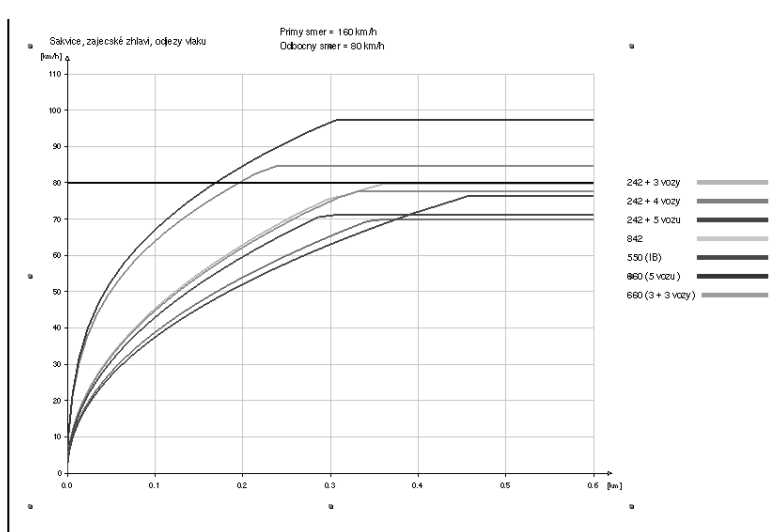
Obr. 5 - Ukázka polygonu

5.2. Úprava rozptylu

Po prvotním vyhodnocení bylo zjištěno, že hodnoty získané ze simulace příliš neodpovídají výsledkům přímého měření. Dalším úkolem bylo upravit nastavení programu tak, aby se co nejvíce přiblížil průběhu přímého měření. Program umožňuje v záložce *Train Categories* rozptyl dosahovaných rychlostí. V základním nastavení je spodní i horní hranice nastavena na 100 %. V další fázi byla tedy spodní hranice snížena na 80%. Zatímco pro původní nastavení dostačovala jedna simulace, v tomto případě byla provedena pětkrát. Tato hodnota byla volena s ohledem na ruční zápis výsledků a časovou náročnost simulace. Rozdíly mezi původním nastavením a upraveným zobrazuje Obr. 6 a Obr. 7.



Obr. 7 – Graf rychlostí při rozjezdu, původní rozptyl



Obr. 6 - Graf rychlostí při rozjezdu, upravený rozptyl

5.3. Modely lokalit

Ke každé lokalitě byly sestavovány dva modely: jeden určený pro simulaci rozjezdů, druhý pro simulaci brzdění. Pro každý model proběhla jedna simulace s dosažením rychlosti a pět simulací se sníženou hodnotou.

V rámci simulace byly modelovány tyto stavy:

Lokalita Šakvice

- Vjezd osobního vlaku ze směru Hustopeče u Brna (rychlost 80 km/h)
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a čtyři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a pět vozů
- Vjezd osobního vlaku ze směru Břeclav (80 km/h)
 - Motorový vůz řady 842
 - Elektrická jednotka řady 550
- Vjezd rychlíku ze směr Břeclav (160 km/h)
 - Elektrická jednotka 660.1 (pětidílná)
 - Dvě elektrické jednotky 660.0 (třídílná)
- Odjezd osobního vlaku ve směru Hustopeče u Brna (rychlost 80 km/h)
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a čtyři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a pět vozů
- Odjezd osobního vlaku ve směru Břeclav (80 km/h)
 - Motorový vůz řady 842
 - Elektrická jednotka řady 550
- Odjezd rychlíku směr Břeclav (160 km/h)
 - Elektrická jednotka 660.1 (pětidílná)
 - Dvě elektrické jednotky 660.0 (třídílná)

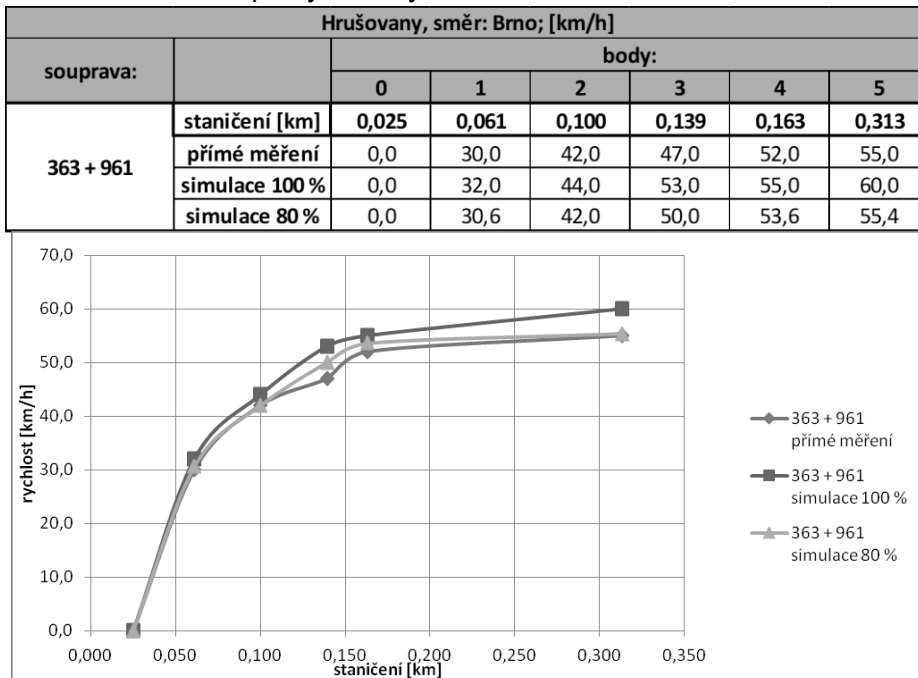
Lokalita Hrušovany

- Vjezd osobního vlaku do směru Hustopeče u Brna (rychlost 160 km/h)
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a čtyři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a pět vozů
- Vjezd osobního vlaku do směru Hustopeče u Brna (rychlost 160 km/h), zastavení 50 metrů od konce nástupiště (koncem soupravy)
 - Lokomotiva řady 242 a čtyři vozy
- Vjezd osobního vlaku ve směru Židlochovice (60 km/h)
 - Dvojice elektrických jednotek řady 550
 - Elektrická jednotka řady 640
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 363 a tři vozy
- Odjezd osobního vlaku ve směru Židlochovice (60 km/h), zastavení 25 metrů za koncem nástupiště (koncem soupravy)
 - Elektrická jednotka 640
- Odjezd osobního vlaku ze směru Hustopeče u Brna (rychlost 160 km/h) od konce nástupiště
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 242 a čtyři vozy

- Lokomotiva řady 242 a pět vozů
- Odjezd osobního vlaku ze směru Židlochovice (160 km/h), 20 metrů od konce nástupiště
 - Dvojice elektrických jednotek řady 550
 - Elektrická jednotka řady 550
 - Elektrická jednotka řady 640
 - Lokomotiva řady 242 a tři vozy
 - Lokomotiva řady 363 a tři vozy

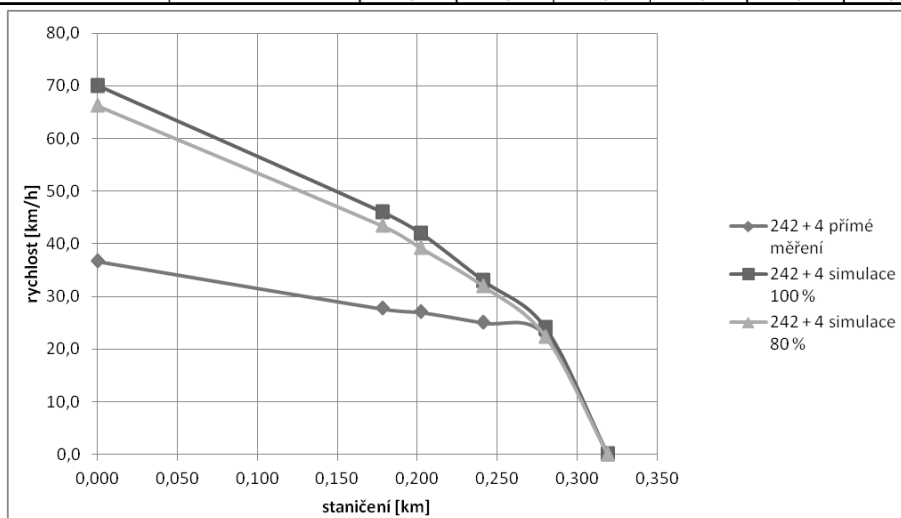
6. Srovnání

Průběh rozjezdu a jeho shoda s teoretickou křivkou je závislý na typu regulace výkonu vozidla. Zatímco elektrická lokomotiva 363 při rozjezdu i brzdění velmi dobře kopíruje průběh teoretické křivky, a to jak tvarem, tak i hodnotami, odlišná situace panuje u vlaků vedených elektrickou lokomotivou řady 242. Při rozjezdu je patrná počáteční vysoká akcelerace, poté (nejspíš po dosažení hospodárných stupňů) je již zrychlování pomalejší, viz grafy: Obr. 8. Analogicky při brzdění je z grafu patrná jízda výběhem, k brzdění dochází až v prostoru nástupiště. Tento fakt může vysvětlovat absence elektrodynamické brzdy u této řady, a tedy obtížněji regulovatelné brzdění při vyšších rychlostech.



Obr. 8 - Graf rozjezdů soupravy s lokomotivou 362 – dobrá shoda se simulací

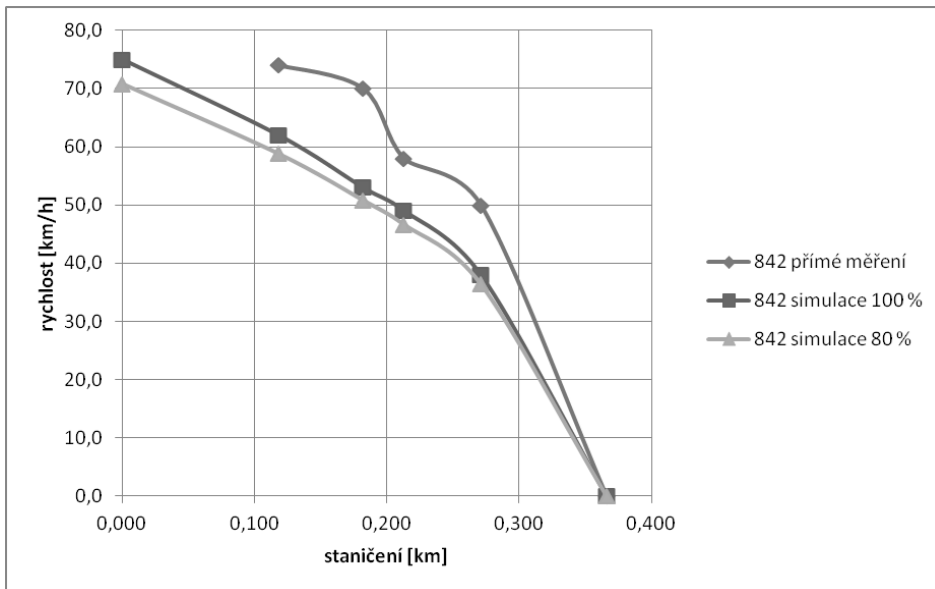
Hrušovany, směr: Židlochovice, Břeclav; [km/h]							
souprava:		body:					
		5	4	3	2	1	0
242 + 4	staničení [km]	0,000	0,178	0,202	0,241	0,280	0,319
	přímé měření	36,7	27,7	27,0	25,0	22,7	0,0
	simulace 100 %	70,0	46,0	42,0	33,0	24,0	0,0
	simulace 80 %	66,2	43,4	39,2	32,0	22,4	0,0



Obr. 9: Brzdění soupravy s lokomotivou 242 - rozdíl simulace oproti přímému měření

Zajímavý úkaz se objevil u průběhu brzdění motorového vozu 842. Zatímco ve všech ostatních případech se výsledky přímého měření nachází pod teoretickou křivkou, v tomto případě je nad ní, navíc rozdíl dosahuje i přes 15 km/h (v bodě 3), viz graf: Obr. 10. Vysvětlením může být buď rezerva v teoretických křivkách, které potom může samotný motorový vůz s účinnými kotoučovými brzdami překonat, nebo ve špatném odhadu zastavení, tj. že by bylo nutné teoretické křivky posunout směrem doprava. V tom případě by však musel stejný jev nastat i u rozjezdu, což však nenastalo. Objasnění by mohlo poskytnout opakování měření, což však není možné, protože daná řada se od změny jízdních řádů na této trati již nevyskytuje.

Šakvice, směr: Brno; [km/h]							
souprava:		body:					
		5	4	3	2	1	0
842	staničení [km]	0,000	0,118	0,182	0,213	0,271	0,366
	přímé měření		74,0	70,0	58,0	50,0	0,0
	simulace 100 %	75,0	62,0	53,0	49,0	38,0	0,0
	simulace 80 %	70,8	58,8	50,8	46,6	36,4	0,0



Obr. 10 - Brzdění motorového vozu 842

7. Závěr

Výsledkem práce je ověření použitelnosti programu OpenTrack pro simulaci chování vlaků ve stanicích. Ve většině případů průběh křivky vycházející ze simulace koreloval s hodnotami z přímého měření. Jedinou výjimku v tomto případě tvořila starší vozidla. V případě simulace lokality, kde se tato vozidla mohou vyskytovat je proto nutné věnovat zvláštní pozornost přípravě simulace, zejména rozptylu rychlostí.

Pro přesnější porovnání bude potřeba sesbírat větší množství dat, včetně rozšíření výběru na nákladní vlaky. Dalším krokem bude změna metody za použití stabilních snímačů přímo v koleji.

Dalším dosaženým cílem je ověření využitelnosti vyšších rychlostí v předjízdnych kolejích. Zejména v lokalitě Hrušovany bylo dokázáno, že vlaky jsou schopny dosáhnout příslušných rychlostí. Lokalita Šakvice ukázala na problém, že při současném systému zabezpečovacího zařízení musejí být celá zhlaví konstruována na vyšší rychlost, než kterou dokáží vlaky vyvinout.

Průlom v tomto ohledu by mohl znamenat příchod ETCS L2, které umožní zvyšovat maximální rychlost po kratších úsecích.

Dalším vývojem práce bude zahrnutí nákladních vlaků. Opět budou vytipovány vhodné lokality. V tomto případě se bude jednat o vjezdy/výjezdy z třídicích nádraží, mezi zvažované varianty patří Brno-Maloměřice a Břeclav.

Zásadním parametrem je však hmotnost nákladního vlaku, která hraje důležitou roli při jeho rozjezdu.

V oblasti osobních vlaků bude pokračovat přímé měření v současných lokalitách, při změně jízdních řádů došlo k obměně vozového parku, bude tedy k dispozici materiál ke srovnání mezi starší a novější generací vozidel.

Literatura

- [1] HORÁK, Matouš. *Rychlost vlaků v kolejových spojeních*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí Ing. Richard Svoboda, Ph.D.

Bezстыková kolej na tramvajových mostech

Ing. Magdalena Křečková¹

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Tháškova 7/2077, 166 29, Praha 6 - Dejvice

e-mail_1: magdalena.kreckova@fsv.cvut.cz,

Abstrakt

Problematika bezстыkové koleje je stále diskutovaným tématem, především v souvislosti s mostními objekty. Problematika je aktuální nejen na železničních tratích, kde se stále častěji navrhuje mostní objekty s dlouhými dilatujícími délkami, ale také na tramvajových tratích. V článku je představena teorie k problematice bezстыkové koleji na tramvajových mostech a zároveň uveden příklad konstrukce, na kterých bylo zahájeno monitorování dilatačních posunů v kolejových dilatačních zařízeních.

Klíčová slova

Bezстыková kolej, kolejové dilatační zařízení

Continuous welded rail track on tramway bridges

Abstract

The issues related to the continuous welded rail remain a debated topic, especially in connection with bridge structures. The issues are relevant not only on railway tracks, where bridge structures with long expansion lengths are increasingly more common, but also on tramway tracks. The article presents the continuous welded rail theory on tramway bridges, including an example of a structure on which the monitoring of expansion displacements in rail breather switches has been initiated.

Keywords

Continuous welded rail track, (rail) breather switch

1. Úvod

I přes to, že aktuálně získané znalosti k zřizování bezстыkové koleje u železničních tratí jsou poměrně rozsáhlé, vyskytují se i tak místa a omezení, která jejímu zřízení brání a je potřeba se jimi při návrhu trati podrobně věnovat. Jedná se například o konstrukce s rozdílným teplotním režimem jako jsou tunely nebo mostní objekty, jejichž dilatační délka a statické uspořádání by mohly ohrozit stabilitu bezстыkové koleje. V takových případech je nutné zřídit dilatační kolejnicové styky na jedné či obou stranách mostů nebo u delších mostních objektů s dlouhými dilatačními celky kolejnicová dilatační zařízení. Obecně je snaha počet kolejových dilatačních zařízení omezit, kvůli komfortu cestujících, omezení dynamických účinků v přechodových oblastech a také kvůli snížení nákladů jak na zřízení konstrukce s kolejovými dilatačními zařízeními, tak na jejich údržbu. V dnešní době jsou mostní objekty navrhovány s velkými rozpony a zároveň i velmi různorodě – každý návrh mostního objektu je unikátní. Proto je potřeba se čím dál častěji individuálně věnovat návrhu bezстыkové koleje na mostních objektech a s tím souvisejícímu návrhu kolejových dilatačních zařízení. I proto je vztah bezстыková kolej – mostní objekt stále diskutovaným tématem nejen v oboru železničního stavitelství, ale také z pohledu návrhu mostních konstrukcí. [1]

Problematika bezстыkové koleje na mostních objektech je aktuální nejen pro železniční mosty, ale stále častěji je diskutována i u tramvajových mostů, které se také navrhují s velkými rozpony. Konstrukční prvky na tramvajových tratích jsou obdobné jako na železničních tratích, nicméně z povahy provozu vyplývají některá specifika, která vedou k nutnosti ověřování, případně optimalizování, použitých železničních prvků, technologií, případně předpisů, což platí i pro návrh mostních objektů a s tím spojených kolejových dilatačních zařízení. Pro příklad rozdílů, které ovlivňují návrh bezстыkové koleje na tramvajových tratích oproti bezстыkové koleji na železničních tratích, lze uvést:

- Tramvajové konstrukce jsou oproti železničním konstrukcím méně zatížené (o více než 50 %);
- Odlišnosti v konstrukci tramvajového a železničního svršku (použití zákrytu, konstrukce W-tram apod.);
- Kolejnice používané u tramvajových tratí jsou zpravidla odlišné (velikost průřezu kolejnice – vliv na velikost vnitřních sil);
- Směrové a sklonové poměry u tramvajových tratí jsou ovlivněny městskou zástavbou a pozemními komunikacemi; atd. [2]

Rozdílů mezi železničními a tramvajovými konstrukcemi je výrazně více, nicméně výše zmíněný výčet dokazuje, že ačkoliv jsou kolejová dilatační zařízení a bezстыková kolej pro železniční stavby často diskutovány, nedají se získané poznatky plně uplatnit i pro tramvajové tratě. Proto je potřeba realizovat měření i na tramvajových tratích, na základě kterých bude možné porovnávat fungování bezстыkové koleje na železničních a tramvajových mostech a zároveň je porovnat s teoretickými znalostmi.

V tomto článku je představen koncept měření dilatačních posunů v kolejových dilatačních zařízeních umístěných na tramvajových mostních objektech umístěných v síti Dopravního podniku hl.m. Prahy.

2. Teoretický úvod

Od začátku železničního stavitelství byla konstrukce železničního svršku založena na volné dilataci kolejnicových pásů. To vedlo k zajištění potřebné stability koleje zejména s ohledem na klimatické vlivy (teplotní namáhání koleje). Délka kolejnic se navrhovala tak, aby se v kolejnici netvořilo napětí od teplotního namáhání. Tím vznikaly v koleji dilatační styky. Každý kolejnicový styk je zároveň nejslabším místem koleje z hlediska údržby, bezpečnosti provozu a plynulosti pohybu vozidel. Je zřejmé, že čím je dilatační spára větší, tím větší jsou dynamické účinky nejen na konstrukci železničního svršku, ale také na vozidla. Proto byla snaha eliminovat kolejnicové styky, případně alespoň zmenšit jejich počet. Důležitým přínosem v tomto ohledu bylo zvětšování délek kolejnic a následně vytvořením konstrukce bezstykové koleje. Díky odstranění kolejnicových styků dochází ke snížení provozních a udržovacích nákladů trati o desítky procent. [3]

Teorie bezstykové koleje je zkoumána od jejího vzniku. Přejít ke konstrukci bezstykové koleje byl umožněn především zdokonalováním upevnění kolejnic k pražcům, zvětšením průřezu používaných kolejnic a v neposlední řadě rozvojem svařovací techniky. [3]

Na mostních objektech se také dává přednost bezstykové koleji před stykovanou kolejí. Zřízení běžného kolejnicového styku se zpravidla vylučuje kvůli přídavnému dynamickému namáhání mostní konstrukce při přejezdu vozidla přes styk (vznik dynamického rázu). U železničních mostů se bezstyková kolej zřizuje všude, kde to umožňuje předpis SŽDC S3 Železniční svršek, Díl XII Železniční svršek na mostních objektech. [6] U tramvajových mostních objektů se také dává přednost zřízení bezstykové koleje (potažmo svařované koleje) z obdobných důvodů jako u železničních mostů, ale pro tyto případy není obdobný předpis.

Pro zřizování bezstykové koleje na mostních objektech s otevřeným kolejovým ložem platí stejné zásady jako pro zřízení bezstykové koleje na zemním tělese. Stejná pravidla platí i pro konstrukce výhradně bez ložisek a s kolejovým ložem ve žlabu. V ostatních mostních objektech s konstrukcemi s ložisky (s kolejovým ložem i bez) se zřizuje kolej podle předpisu SŽDC S3 díl XII Železniční svršek na mostních objektech. [5], [6]

Pro zřízení bezstykové koleje na mostním objektu je rozhodující jeho statické schéma. U mostů s ložisky jsou rozhodující dilatující délky nosných konstrukcí L_T . Dilatující délky mostu jsou rozděleny dle umístění pevných ložisek. Mostní konstrukce mají jednu nebo dvě dilatující délky podle toho, jestli je pevné ložisko na konci nosné konstrukce nebo mezi pohyblivými ložisky. Pokud je pevné ložisko na konci nosné konstrukce, má mostní konstrukce jednu dilatující délku. Naopak pokud je pevné ložisko mezi pohyblivými ložisky,

má nosná konstrukce dvě dilatující délky. [6] V případě, že je v konstrukci více pevných ložisek, může mít mostní konstrukce více než 2 dilatující části. Největší přípustné dilatující délky L_T nosných konstrukcí mostů pro zřízení bezстыkové koleje jsou uvedeny v následující tabulce (tab.1). V případě větších dilatačních délek je třeba provést individuální řešení. To platí i pro vybrané mostní objekty, na kterých začala měření v konstrukcích koleje a mostu, která ukazují reálné hodnoty pohybu kolejnicových pásů bezстыkové koleje a mostní konstrukce v závislosti na změně teploty ovzduší, resp. mostu.

Tab.1 Největší přípustné dilatující délky L_T nosných konstrukcí mostů pro zřízení bezстыkové koleje

V bezстыkové koleji s plným napětím (v části bez možnosti dilatace – střední část bezстыkové koleje) se projevuje vliv klimatických podmínek změnou teploty kolejnicových pásů. To způsobuje změnu vnitřních sil v kolejnici (resp. vnitřního napětí). Velikost změny vnitřní síly je úměrná velikosti změny teploty kolejnice. Ke stanovení změny hodnoty se využívá Hookův zákon. Zároveň je změna vnitřní síly v kolejnici závislá na velikosti průřezové plochy kolejnice:

$$P = \alpha \times \Delta t \times E \times F$$

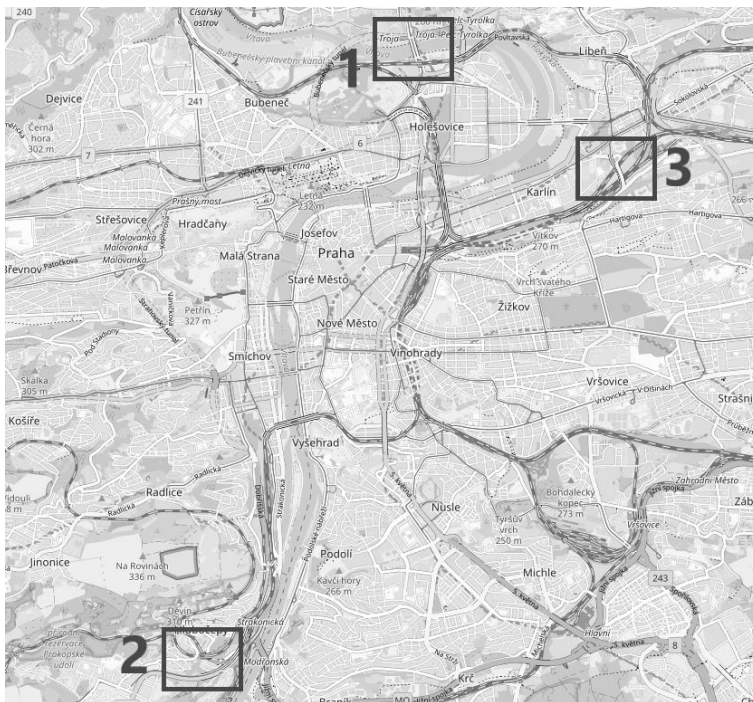
kde α je teplotní součinitel roztažnosti oceli (0,00012 K⁻¹), Δt je teplotní rozdíl, E je modul pružnosti a F je průřezová plocha kolejnice. Pro kolejnici 49E1, neojetý profil, je velikost vznikající osově síly při změně o 1°K 14,82 kN. V dýchajících koncích bezстыkové koleje (v krajních částech) je bráněno délkovým změnám kolejnicových pásů zejména odpory proti posunutí kolejnice v upevnění, případně ve spojkách. Odpor proti posunutí kolejnice v upevnění musí při jeho správné montáži dosahovat velikosti min. 7 kN na upevnění. [4] Případný posun je realizován v uzlu upevnění kolejnice k pražci (nedochází k posunu celého roštu). Celkový pohyb na konci bezстыkové koleje (tedy v koncovém dilatačním styku) závisí na celkovém odporu proti posunu kolejnice, teplotnímu rozdílu vůči upínací teplotě kolejnicového pásu a na průřezu profile kolejnice. Předepsaná upínací teplota je v rozmezí +17 °C až +23 °C. [5] Teplota kolejnicových pásů se vlivem klimatických změn a slunečního svitu může pohybovat v rozmezí -30 °C až +60 °C. Z těchto údajů lze spočítat teoretickou sílu z bezстыkové koleje působící v oblasti mostního závěru a zároveň pohyb v dilatačním styku na konci bezстыkové koleje (tedy v kolejovém dilatačním zařízení). Ten se určí ze vztahu:

$$\Delta l = \frac{\alpha^2 \times E \times F}{k_p} \times \int_{t_0}^t (t - t_0) dt$$

kde α je teplotní součinitel roztažnosti oceli, $(t-t_0)$ je maximální rozdíl teplot, E je modul pružnosti a F je průřezová plocha kolejnice a k_p je odpor kolejnice v upevnění **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů., Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Vztah je zjednodušený a neuvažuje s pohybem mostní konstrukce.

3. Příklad provedených měření

Individuální řešení se nachází i na vybraných tramvajových estakádách a mostech, které byly zvoleny pro měření dilatačních posunů v kolejových dilatačních zařízeních. Celkem byly vybrány 3 mostní objekty v síti Dopravního podniku hl.m. Prahy. Je to Trojský most, Barrandovská estakáda a estakáda mezi tramvajovými zastávkami Palmovka – Ohrada (dále estakáda Palmovka – Ohrada) – všechny zmíněné lokality jsou znázorněny na následující mapě (obr. 1). Vzhledem k rozsahu článku bude dále popsáno měření pouze na jednom z mostních objektů, a to na estakádě Palmovka – Ohrada.



Obr. 1 Poloha sledovaných mostních objektů v síti Dopravního podniku hl.m. Prahy. 1 – Trojský most; 2 – Barrandovská estakáda; 3 – Estakáda Palmovka – Ohrada

Měření na estakádě Palmovka – Ohrada začalo v létě roku 2023 a bude dále probíhat i v následujících letech. Návrhová rychlost je ve sledovaném úseku $v=50$ km/h (při nedostatku převýšení 130 mm je $v_{130}=60$ km/h). Trať je na estakádě vedena pomocí 4 směrových oblouků. Sklonové poměry jsou na estakádě proměnné v rozmezí od 7,4 ‰ do -6,34 ‰. Délka estakády je zhruba 455,449 m. Nosná konstrukce je uložena na 12 pilířích z nichž 2 pilíře, zhruba uprostřed konstrukce, mají pevné ložisko (v 1 poli je zabráněno dilatačním podélným pohybům). Dilatační délky jsou 196 m a 214 m.

Na estakádě je zřízena bezстыková kolej na betonových pražcích v kolejovém loži ve žlabu. Nosná konstrukce mostu je komůrkový betonový předpjatý nosník o 12 polích. Tramvajový svršek tvoří kolejnice 49E1, pružné upevnění W14, betonové pražce typ ŽPSV B03 DP01 var. 2, rozdělení pražců v koleji je 0,35 m. Tloušťka kolejového lože je min. 325 mm pod dolním kolejnicovým pásem. V celé délce estakády jsou zřízeny pojistné kolejnice. Kolejová dilatační zařízení jsou umístěna na obou koncích estakády ve směrovém oblouku s převýšením. Na jižní straně estakády (blíže k tramvajové zastávce Ohrada) jsou dilatační zařízení umístěna ve směrových levostranných obloucích o poloměrech $R=250,55$ m a s převýšením $D=80$ mm (kolej č.1) a $R=254,05$ m a převýšením $D=80$ mm (kolej č.2). Na severní straně estakády (blíže k tramvajové zastávce Palmovka) jsou dilatační zařízení umístěna ve směrových pravostranných obloucích o poloměrech $R=254,05$ m a převýšením $D=76$ mm (kolej č.1) a $R=250,55$ a převýšením $D=76$ mm (kolej č.2). Na jižní straně estakády jsou kolejová dilatační zařízení umístěna v podélném sklonu 7,4 ‰. Na severní straně estakády jsou kolejová dilatační zařízení umístěna v podélném sklonu -6,23 ‰. Maximální posun jazykové kolejnice v kolejovém dilatačním zařízení je ± 100 mm. Délka dilatačních zařízení je 9,85 m a jsou umístěna na dubových pražcích. Bezстыková kolej byla na estakádě zřízena při upínací teplotě 23 °C.

Pro měření pohybu jazykové kolejnice v dilatačním zařízení byly zvoleny dvě na sobě nezávislé metody, které mají zajistit kontinuitu měřených dat při případném poškození měřicí báze. Začátek měření byl naplánován v létě roku 2023 (kvůli vysokým teplotám) a následně bude pokračovat během jednotlivých ročních období v závislosti na teplotních podmínkách ovzduší.

Prvním způsobem pro měření vzájemné polohy kolenové a jazykové kolejnice bylo zvoleno měření ocelovým měřítkem připevněným na stojině kolenové kolejnice. Ve druhém způsobu byly na stojiny kolejnicových pásů vyznačeny fixní body pomocí reflexních geodetických štítků s vyznačeným křížem pro měření vzájemné polohy. V minulosti byla tato měření praktikována díky vyvrtaných otvorů v kolejnicových pásech. Tento způsob nebyl možný praktikovat (i přes to že má větší pravděpodobnost dlouhodobého zachování), protože se jedná o nově zrekonstruovaný úsek (dokončení rekonstrukce červen 2023). Oba způsoby měření jsou patrné z následujícího obrázku (obr. 2).



Obr. 2 Znárodnění způsobů měření vzájemné polohy jazkové a kolenové kolejnice

Pro porovnání pohybu mostní konstrukce byly na konstrukci zřízeny podobné fixní body pomocí odrazných štítků, které představují další měřicí bázi. V rámci měření je také zapisována aktuální teplota ovzduší, kolejnicových pásů a mostní konstrukce (při vrchním i spodním povrchu). Vzájemný pohyb pražců a mostní konstrukce byl v této fázi sledování zanedbán.

V tuto chvíli není možné representovat výsledky z měření, protože objem získaných dat je příliš malý. Pomocí výše popsaného způsobu měření budou sledovány všechny mostní konstrukce. Ve chvíli, kdy bude soubor dat dostatečně velký pro statistické vyhodnocení měření, budou jednotlivé hodnoty porovnávány s teoretickými výpočty. V další fázi vyhodnocení dat bude model konstrukce řešen jako 1D model složený ze dvou spolupůsobících elastickým elementárních dílů – kolejnicový pás a mostní konstrukce včetně kolejového lože, pražců a upevnění. Na základě získaných hodnot bude určena hodnota měrného odporu proti posunutí.

4. Závěr

Cílem prováděného měření by mělo být porovnání mezi naměřenými hodnotami s hodnotami teoretickými a zároveň porovnání mezi jednotlivými lokalitami. Následně by mělo být určeno, jestli dochází k vzájemnému pohybu kolejového roštu a mostní konstrukce při změně

teploty. Ze získaných dat (teplota mostu, teplota kolejnice, hodnoty posunutí kolejnice v dýchajícím konci) bude spočtena hodnota měrného odporu proti posunutí vůči mostní konstrukci, který ovšem není možné porovnávat s používanou hodnotou odporu proti posunutí kolejnice v upevnění (vliv konstrukce tramvajového svršku). Dále by bylo možné do výpočetního modelu zohlednit směrové poměry, které jsou na estakádě Ohrada-Palmovka složité a tím výpočetní model zpřesnit. V neposlední řadě se nabízí v modelu zohlednit i součásti kolejového roštu a blíže zkoumat jednotlivé odpory vůči posunutí.

Literatura

- [1] Interakce mostní konstrukce a bezстыkové koleje. Vendel, J. Disertační práce. VUT v Brně, 2021
- [2] Využití prvků železničního svršku v konstrukci tramvajových tratí. Krejčířková, H., Kubát. B., IX Krajowa Konferencja Naukowo – Techniczna, 1997
- [3] Ověřování ocelových pražců Y v konstrukci železničního svršku na celostátních a regionálních tratích v České republice. Suchánek, A. Disertační práce. ČVUT v Praze, 2012
- [4] Modern Railway Track. Esveld, C. Second edition; MRT-Production, 2001
- [5] Předpis S3/2 Bezстыková kolej. Schváleno generálním ředitelem SŽDC dne: 24.5.2013 pod č.j. S11167/2013-OTH, účinnosti od 1. září 2013
- [6] Předpis S3 Železniční svršek, Díl XII Železniční svršek na mostních objektech, ve znění změny č. 4, účinnost od 1.3.2021

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován za podpory projektu Fakulty stavební ČVUT SGS23/044/OHK1/1T/11.

Možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy

Ing. Jiří Krejčí,

ČVUT v Praze Fakulta dopravní
Konviktská 293/20, 110 00, Praha 1 – Staré Město
e-mail: krejcyj31@fd.cvut.cz

Abstrakt

Předmětem tohoto článku je prověření možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy v České republice. Pro možnost stanovení spotřeby energie z trakčního akumulátoru je uvedena základní metoda.

Klíčová slova

Železniční doprava, životní prostředí, alternativní pohony, jednotky BEMU, dvousložková metoda, trakční akumulátor

Possibilities of operating BEMu units on passenger regional rail transport lines

Abstract

The subject of this paper is the verification of the possibility of BEMU units operating on lines of passenger regional rail transport in the Czech Republic. For the possibility of determining the energy consumption from the traction accumulator, the basic method is given.

Keywords

Rail transport, environment, alternative drives, BEMU units, two-component method, traction accumulator

1. Úvod

V několika posledních letech (přerušených obdobími omezení plynoucích z opatření proti šíření viru COVID19) dochází ke zvýšenému nárůstu intenzity veškeré dopravy, kdy se tento trend nevyhnul v lukrativních relacích ani dopravě železniční. Kromě zajištění konkurenceschopnosti železnice s ostatními druhy dopravy klade lidstvo důraz na udržitelný rozvoj. Tím je myšleno především to, aby nebyly uspokojovány lidské hodnoty na úkor následujících generací. Z tohoto důvodu je důležité i v železniční dopravě (i přesto, že patří k druhům dopravy nejméně zatěžujícím životní prostředí) zajistit ochranu životního prostředí, snížit uhlíkatou uhlíkovou stopu a produkci škodlivých látek.

Nejvíce problémové, z hlediska znečišťování ovzduší na železnici, jsou regionální tratě, kde provoz zajišťují v zásadě pouze vozidla nezávislé trakce. Náhradou by měly být v České republice vozidla, respektive vlakové jednotky typu BEMU (battery electric multiple unit) s trakčními akumulátory. Daná vozidla jsou právě vhodná na regionální tratě, které propojují uzlové železniční stanice představující „napájecí bod pro nabíjení“. Náhradou vozidel závislé trakce by mohly být i jednotky typu HEMU (hydrogen multiple unit)/HEMU (hydrogen electric multiple unit) s palivovým článkem. Provoz těchto zmíněných jednotek ale není na české železniční síti vhodný (viz kapitola 4.2.).

Vzhledem k tomu, že daná vozidla mají svá omezení, především dojezdovou vzdálenost na nabitý akumulátor, musí být prověřena možnost jejich nasazení do pravidelného provozu. V tomto článku je uvedena základní metoda pro stanovení spotřeby provozu daného vozidla, založena na dvou složkách (označovaná proto také jako dvousložková). Jedná se o princip součtu spotřeby energie pro trakci a vedlejší pohony, jako je vytápění/klimatizace, pohony kompresorů, osvětlení, informační systém pro cestující a další.

2. Energie pro dopravu

Mezi negativní dopady dopravy, která využívá k pohonu spalování fosilních (přírodních uhlovodíkových) paliv, se řadí především produkce oxidu uhličitého způsobující globální oteplování, emise škodlivých látek do ovzduší a zároveň zvyšující se nárok na spotřebu energie (v České republice se doprava podílí na spotřebě energie 27 % v porovnání s průmyslem, který ročně spotřebuje 31 %). Uvedené negativní dopady jsou především spojené s takzvanou primární energií (například fosilní paliva), která je během spalování přeměna na takzvanou energii sekundární. Ta je následně použita pro samostatný pohyb dopravního prostředku. Cílem dnešní společnosti je získávat primární energii z obnovitelných zdrojů a snížit tak produkci nebezpečných látek. [1] [2]

Kromě snížení spotřeby energie a produkce škodlivých látek je cílem České republiky snížit závislost na dovozu fosilních paliv ze států, které jimi disponují. Necelých 93 % energie, kterou doprava v České republice spotřebuje, je získávána z importovaných fosilních paliv (91,3 % ropné produkty, 1,4 % zemní

plyn). Pro zajímavost, podíl spotřebované ropy v rámci Evropské unie je 112krát větší než podíl vlastních zásob v rámci unie. [1] [2]

3. Vztah železnice a životního prostředí

Postupným historickým vývojem se lidstvo snaží přicházet s novými prostředky, které by zjednodušovaly a ulehčovaly lidskou činnost. Tento trend se nevyhnul ani železniční dopravě. Od prvních pohonů animálních (dráhy koněspřežné), přes parní trakci, nezávislou trakci až k trakci závislé. Daný historický vývoj byl ovlivněn několika aspekty. Mezi zásadní hlediska především patřila energie pro pohyb vozidla (sekundární energie) a její získávání (primární energie). Zároveň nesmíme opomenout i účinnost jednotlivých druhů vozby¹. Přehled jednotlivých pohonů a jejich účinností je v následující tabulce (viz. Tab. 1.). [2]

Tab. 1. Účinnost jednotlivých druhů pohonů

Druh pohonu	Účinnost
Parní stroj a kotel	6 %
Spalovací motor vznětový (nafta) a přenos výkonu	32 %
Spalovací motor zážehový (benzín, metan) a přenos výkonu	32 %
Trakční elektromotor a palivový článek (vodík)	48 %
Trakční elektromotor a lithiový akumulátor (pod trakčním vedením)	70 %
Trakční elektromotor a liniové trakční vedení	80 %

Zdroj: [2]

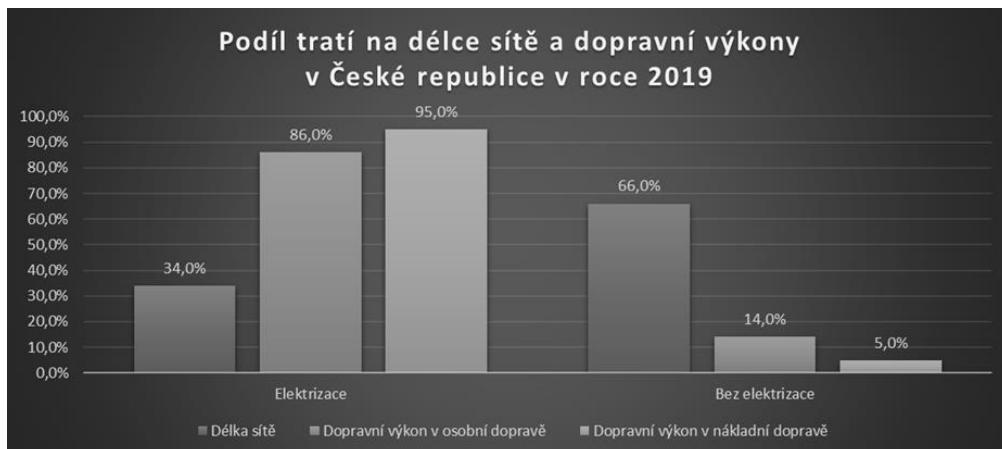
Z hodnot uvedených v tabulce je patrný postupný historický vývoj pohonu na železnici. Prvním uvedeným pohonem je parní trakce. Samotný parní stroj dosahuje účinnosti 15 %, ale je zapotřebí brát také v potaz účinnost parního kotle. Ten slouží k výrobě páry, a je tedy součástí řetězce pro přenos výkonu na kola. Po vynásobení jednotlivých účinností dosahuje výsledná hodnota pouze 6 %. S objevem spalovacího motoru, který se začal používat i v železniční dopravě, vzrostla účinnost na více než pětinasobek. Opět se jedná o výslednou účinnost, která zahrnuje spalovací motor a přenos výkonu na obvod kola. Individuální účinnost vznětového motoru činí 40 %, zážehového 36 %. Trakční elektromotor společně s transformátory, měniči a převody dosahuje účinnosti zhruba 86 %, při zahrnutí trakční napájecí stanice a trakčního vedení je výsledná účinnost 80 %. Samotná vozidla s trakčním akumulátorem dosahují výsledné účinnosti o 10 % nižší než vozidla závislé

¹ Řízený pohyb drážního vozidla po železniční dráze. Dle způsobu pohybu vozidel podle přívodu energie se daná charakteristika rozděluje na: závislá vozba, polozávislá vozba a nezávislá vozba. [3]

trakce. Nižší účinnost je způsobena především větším množstvím součástí daného železničního vozidla (trakční napájecí stanice a liniové trakční vedení 25 kV, 50 Hz s účinností 95 %; transformátor, měniče, trakční akumulátor s měničem o účinnosti 88 %; trakční elektromotor s převody zhruba o účinnosti 86 %). Pouhých 48 % dosahuje výsledná účinnost u vozidel, využívajících pro svůj pohyb elektromotor s palivovým článkem. Jednotlivé části vozidla dosahují ale až účinnosti 80 % (vodíkový palivový článek, vyrovnávací akumulátor, měniče, trakční elektromotor, převod). Z uvedené tabulky ale vyplývá, že jednotlivé kombinace s elektromotorem dosahují vyšší účinnosti než spalovací motory. [2]

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, mezi dnešní priority patří dekarbonizace dopravy (tj. snížení uhlíkové stopy) a eliminace škodlivých exhalací vypouštěných do ovzduší při spalování fosilních paliv v motorech. Tyto cíle také sleduje Evropská komise, která vydala jednotlivá sdělení, například ve Sdělení Evropské komise COM(2019) 640 Green Deal, kde je v kapitole 2.1.5 stanoveno, že do roku 2050 se mají snížit emise z dopravy o 90 % a do roku 2050 převést 75 % nákladní dopravy ze silnic na železnici a vodu. Z hlediska tohoto sdělení je důležité, aby v době, kdy má dojít k převedení dopravy, byla železniční doprava co nejvíce ekologická a zároveň dostatečně kapacitní. To znamená, že je zapotřebí docílit co největšího rozvoje užití elektrické energie pro pohon jednotlivých vozidel. Toto tvrzení vychází z předchozí tabulky (viz Tab. 1.), kde elektromotor dosahuje více jak dvojnásobné účinnosti, oproti spalovacímu motoru. Pro porovnání, v roce 2019 se fosilní paliva podílela na spotřebě energie v dopravě 92,8 % při přepravním výkonu 74 %. Naopak elektrická energie se na spotřebě podílela 2,2 % při přepravním výkonu 22 %. [1], [2]

Na základě dohledatelných dat pro rok 2019 (před nemocí COVID-19) byl zpracován graf (viz Graf 1.), který znázorňuje podíl elektrizovaných a neelektrizovaných tratí a dopravní výkony v osobní i nákladní dopravě na nich v České republice. K 31. prosinci 2019 bylo z celkové délky tratí 9 369 km v provozu 3 213 km elektrizovaných tratí. Ačkoliv se trakční vedení nacházelo pouze na 34 % délky železniční sítě, zajišťovaly elektrizované tratě v České republice 86 % dopravního výkonu v osobní dopravě a 95 % dopravního výkonu v dopravě nákladní. Je tedy patrné, že většina dopravních výkonů byla uskutečněna na síti příznivé k životnímu prostředí, a je tedy vhodné danou síť tratí vybavených pevnými trakčními zařízeními rozšířit. [2]



Graf 1. Podíl tratí na délce sítě a dopravní výkony v České republice v roce 2019

Zdroj: [2]

4. Náhrada vozidel nezávislé trakce

4.1. Trakční vedení

První možností, jak omezit pravidelný provoz se spalovacími motory je výstavba trakčního vedení a následný provoz vozidel závislé trakce. Rozšiřování tratí s trakčním vedením není ale v České republice příliš rychlé. Jedním z hlavních důvodů je cena výstavby, která dosahuje u jednokolejné trati 7 milionů Kč na kilometr. Přitom největší nákladovou položku při liniové elektrizaci představuje výstavba trakčních napájecích stanic a jejich připojení na veřejnou energetickou síť. Mezi další argumenty lze zařadit neekologickou výrobu velkého podílu elektrické energie v České republice v uhelných elektrárnách. Jejich náhradou jsou dnes elektrárny jaderné, které mají zase jiná negativa. Pro životní prostředí jsou ale nejvíce šetrné ty elektrárny, které pro svou výrobu používají obnovitelné zdroje (elektrárny vodní, větrné, solární a na biomasu), i když i u těchto zdrojů je nutné zohledňovat jejich další vlivy na životní prostředí (hluk větrných elektráren, zábor orné půdy u solárních elektráren, změna krajinného rázu...). [2]

4.2. Alternativní pohony

Druhá možnost pro dosažení ekologičnosti železnice spočívá pouze v nahrazení vozidel, tedy bez velkého nutného zásahu do infrastruktury. Tím je myšleno, že vozidla závislé trakce mají být nahrazena vozidly s alternativními pohony. S tímto pojmem se na železnici spojují dvě varianty. První variantou jsou vozidla se zásobníky pro vodík a následné použití zmíněného plynu v palivovém článku. Druhou variantou je využití zásobníku energie v podobě

elektrochemického akumulátoru (zpravidla lithiový). V obou zmíněných variantách je ale pohyb vozidla umožněn trakčním elektromotorem. [2]

Jednotky, označované zkratkou HMU (hydrogen multiple unit), využívají na železnici vodík a palivový článěk. V případě, že dané jednotky jsou schopné odebírat energii z trakčního vedení, jsou označovány jako HEMU (hydrogen electric multiple unit). Mezi výhody jednotek s palivovým článkem patří především vysoká účinnost vozby oproti vozidlům nezávislé trakce (viz Tab. 1.) a dlouhý dojezd (například u jednotky Coradia iLint od společnosti Alstom je uváděn dojezd 600 km až 800 km). Naopak nevýhodou těchto jednotek je samotný vodík. Pro to, aby tento plyn mohl být využitý ve zmíněném článku musí dosahovat čistoty 99,97 %. Z toho vyplývá, že v oblastech s velkou koncentrací chemických závodů, kde je vodík produkován jako odpadní produkt, není možné jeho okamžité využití v palivovém článku. Česká republika nemá v současné době uspokojivou produkci daného plynu a zároveň ani infrastrukturu na dostatečně vysoké úrovni pro pokrytí spotřeby na železnici. Mezi další nevýhody vodíku patří jeho vysoká hořlavost a výbušnost, proto je zapotřebí jej skladovat ve vysoce odolných a těžkých nádobách (například z oceli nebo kompozitu). Z uvedených informací je patrné, že nasazování vozidel HMU/HEMU do pravidelného provozu v České republice není perspektivní. [2]

Příznivějším alternativním pohonem v České republice je využití zásobníků primární energie v podobě elektrochemických akumulátorů. Jejich princip provozu spočívá v tom, že daná vozidla (BEMU) mají být nasazována do pravidelného provozu trasách železniční sítě, kde není trakční vedení a v nejbližší době není uvažováno o jeho výstavbě. Důležité je ale zmínit, že vozidlo BEMU je perspektivní při uvažování výstavby liniové elektrizace ve výhledu například 8 až 10 let. Jednotka totiž umožňuje přeměnu z BEMU na EMU (viz kapitola 5.1.). Vzhledem k tomu, že je daný článek zaměřen na vozidla s akumulátorem, je podrobnější popis BEMU uveden v následující kapitole (viz kapitola 5.). [2]

5. Hybridní elektrické jednotky s akumulátory (BEMU)

Nejen nedostatečná distribuce vodíku v rámci České republiky (viz kapitola 4.2.) způsobuje, že perspektiva alternativních pohonů na české železnici spočívá především v jednotkách BEMU. Jak již bylo zmíněno, jejich nasazování do provozu by mělo být na relacích, které z části vedou po železniční síti bez trakčního vedení. Na těchto tratích je v současnosti provoz zajišťován vozidly nezávislé trakce, které nejsou příznivé pro životní prostředí. [2]

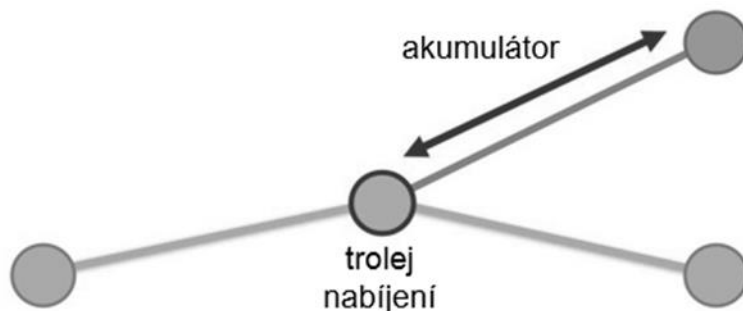
5.1. Infrastruktura potřebná k nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu

Vozidlo s trakčním akumulátorem je konstrukčně uzpůsobeno jak pro jízdu na tratích s liniovou elektrizací, tak i bez liniové elektrizace. V případě, kdy se

jednotka BEMU nachází pod trakčním vedením, tak pro samotný pohon a ostatní pomocné pohony (viz kapitola 1.) odebírá energii ze zmíněného vedení. V případě, kdy se vozidlo nachází mimo liniovou elektrizaci, odebírá elektromotor a pomocné pohony energii ze zásobníku, tedy z trakčního akumulátoru. [2]

Rozdíl mezi jednotkami BEMU a EMU není na první pohled příliš znatelný. Dnešním trendem je využívat moderní lehké jednotky, které poskytují dostatečný komfort, nízkopodlažnost, rychlou akceleraci, dostatečný výkon a stanoviště strojvedoucího na obou stranách jednotky. Odlišnost mezi zmíněnými jednotkami spočívá pouze v umístění zásobníku energie v podobě elektrochemického akumulátoru a k tomu potřebné měniče s příslušenstvím u jednotek BEMU. Právě trakční akumulátor a potřebná technologie velice často rozhoduje o nasazení jednotek do pravidelného provozu, jelikož jednotka BEMU je o 30 % až 50 % dražší než jednotka EMU. Je tedy zapotřebí před nasazením provést ekonomickou analýzu, spočívající v prověření těchto dvou variant. Analýza by měla porovnat nákup jednotek BEMU a jejich následný provoz s výstavbou liniové elektrizace, nákupem a provozem jednotek EMU. S výstavbou trakčního vedení souvisí i zajištění potřebné elektrické distribuční sítě. [2]

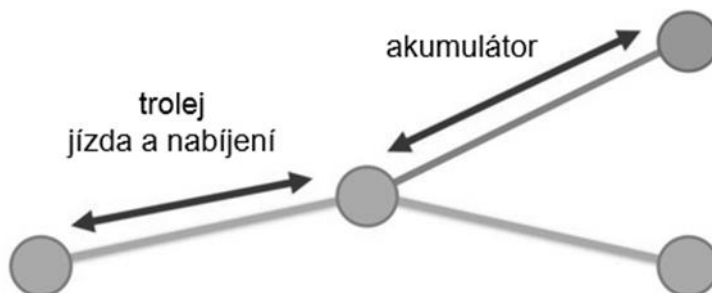
Pro provoz jednotek BEMU na železniční síti je především zapotřebí zajistit možnost nabíjení akumulátoru. První princip možnosti obnovy energie v akumulátoru, z hlediska napájecích bodů, je založený pouze na nabíjení v jedné koncové železniční stanici (viz Obr. 1.), tedy během jejího stání. V případě, kdy se vozidlo během nabíjení nepohybuje, je tento stav nazýván jako statické nabíjení. V případě zmíněného principu vozidlo odebírá energii z trakčního akumulátoru pro jízdu i pomocné pohony mezi koncovými stanicemi (tam i zpět) a zároveň pomocné pohony odebírají energii v obrátové stanici. Na základě dnes uváděných parametrů výrobci jednotek BEMU je dojezdová vzdálenost 40 km až 60 km. Uvedená vzdálenost se vztahuje pro jeden směr zmíněné situace (možnost nabíjení pouze v jedné koncové stanici). Interval vzdáleností pro dojezd vychází z počtu zastaveních (možnost využití rekuperace do akumulátoru) a následujících rozjezdů, podélného profilu tratě (stoupání a klesání) a délky pobytu v obrátové stanici. V případě, kdy nastane možnost nabíjení i v druhé obrátové stanici, zvětší se dojezdová vzdálenost na dvojnásobek, tedy na 80 km až 120 km v jednom směru. [2]



Obr. 1. Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici

Zdroj: [4]

Dnešní technologie umožňují obnovu energie v akumulátoru i během pohybu vozidla. Toto nabíjení je pak označováno jako dynamické a princip je znázorněn na Obr. 2. Je ale nutné zmínit, že během zmíněného nabíjení není možné dosáhnout stejného limitního příkonu, jako při nabíjení statickém, jelikož zde dochází kromě odběru energie pro nabíjení akumulátoru a pomocné pohony také k odběru energie pro pohyb jednotky. Limitní příkon pro dynamické nabíjení je uvažován zhruba o 40 % menší než příkon pro statické nabíjení.



Obr. 2. Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici a mezistaničním úseku

Zdroj: [4]

Cílem nasazení jednotek do pravidelného provozu spočívá ve využití stávající železniční sítě s trakčním vedením. Pro příklad je možné zmínit spojení mezi Táborem a Strakonice přes Písek na tratích číslo 190 a 201 (dle KJŘ 2022/2023). Jednotka by využívala energii z akumulátoru mezi žst. Tábor a žst. Písek, kde jejich vzdálenost dosahuje zhruba 60 km (vzdálenost menší než 80 km). Ze žst. Písek do žst. Strakonice (vzdálenost mezi žst. činí

zhruba 22 km) by se vozidlo pohybovalo již pod trakčním vedením, a tudíž by docházelo k nabíjení dynamickému. V situaci, kdy by nedošlo k plné obnově energie akumulátoru mezi žst. Písek a žst. Strakonice, by mohla jednotka BEMU k úplnému nabití akumulátoru využít obrát v žst. Strakonice (nabíjení statické) anebo trakční vedení při zpáteční jízdě mezi žst. Strakonice a Písek (nabíjení dynamické). [2]

Samotné nabíjení a vybíjení akumulátoru ovlivňuje jeho životnost. Ta se odhaduje na poloviční, než je životnost samotného vozidla (30 let), tedy cca. 10–15 let. Z toho vyplývá, že jednou bude muset být trakční akumulátor vyměněn. Jednotky BEMU však mohou být provozovány i jako jednotky EMU. V případě, kdy dojde k vybudování trakčního vedení, může být vyjmut akumulátor a z jednotky se stává vozidlo závislé trakce. To je další princip, jak překonat období, než bude vybudováno trakční vedení na určité trati. [2]

5.2. Zdroj získávání energie

Při úvaze o nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu je zapotřebí brát v potaz, jakým příkonem by byla obnovena energie v akumulátoru. Pro nabíjení je vhodnější střídavý napájecí systém 25 kV, 50 Hz. To jej již patrné z dosazení do následujícího vzorce:

- pro stejnosměrný napájecí systém 3 kV

$$P = U \cdot I = 3\,000 \cdot 200 = 600$$

- pro střídavý napájecí systém 25 kV, 50 Hz

$$P = U \cdot I = 25\,000 \cdot 80 = 2\,000$$

kde:

P [kW]

U [V]

I [A]

příkon

elektrické napětí

elektrický proud

Z dosazení vyplývá, že střídavý napájecí systém umožňuje oproti stejnosměrnému napájecímu systému rychlejší nabíjení. Ve vzorcích se ale liší hodnoty proudu. Hodnota 200 A u stejnosměrného napájecího systému je stanovena na základě TSI (technické specifikace pro interoperabilitu). Vysoké hodnoty proudu zároveň způsobují to, že sběrače stejnosměrných vozidel musí být silnější (schopnost odolávat velkým proudům) oproti sběračům pro střídavý napájecí systém. Zároveň u posledního zmíněného systému jsou nižší proudy, jelikož nejsou stanoveny žádnými předpisy ani normami (hodnota menší, než u stejnosměrného napájecího systému), vzhledem k vyššímu napětí. Z tohoto důvodu je pro příkon 2 000 kW dostačující proud pouze 80 A. [1]

5.3. Prověření provozu jednotek BEMU

Při návrhu dopravní obslužnosti určitého území železniční osobní dopravou se v dnešní době (v některých případech) uvažuje o nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu. Při výběru konkrétní jednotky je zapotřebí brát v potaz parametry, které nasazení vozidel do pravidelného provozu omezují. Nejdůležitějším z nich je předpokládaný dojezd na nabitý akumulátor (80 km až 120 km v jednom směru, při možnosti nabíjení v obou koncových stanicích).

Samotné prověřování nasazení jednotek BEMU probíhá ve dvou krocích. Prvním z nich je určení tratě, na které by mohlo dojít k využití výhod zmíněných jednotek. V tomto kroku se především jedná o určení délky tratě bez liniové elektrizace a zároveň infrastrukturní předpoklady pro možnost nabíjení vozidla. V případě, pokud daná zvolená trať vyhovuje svoji délkou a infrastrukturou, dochází k druhému prověření. To již probíhá na základě stanovených výpočtů spotřeby energie a dalších hodnot samotného vozidla. V dnešní době probíhají tyto výpočty a následné modely počítačovými programy. Během návrhu je zapotřebí uvažovat jak se simulací pravidelného provozu (například spotřeba energie z akumulátoru v obrátové stanici bez trakčního vedení), tak i se situacemi kdy nastanou vlivy zpoždění způsobné křížováním nebo nepravidelnostmi (například uvážnutí jednotky vlivem nepříznivých povětrnostních podmínek). Tyto nepravidelnosti je zapotřebí během návrhu ověřit, tedy zda jednotka bude mít například při zpoždění křížování (vozidlo se ve stanici nepohybuje, ale odebírá energii pro pomocné pohony) dostatečné množství energie v akumulátoru pro jízdu do cílové stanice (akumulátor bude mít méně energie). Vystává tedy další otázka, zda bude pro nabíjení dostačující pravidelná doba pobytu ve stanici nebo bude muset dojít k jejímu prodloužení. Z dopravního hlediska je důležité si uvědomovat možnost vzniku těchto situací, než dojde k nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu.

5.4. Sestavení základního modelu vybíjení a nabíjení akumulátoru jednotky BEMU na principu dvousložkové metody

Jeden ze základních principů prověření jak pravidelného, tak i nepravidelného provozu jednotek BEMU je založen na takzvané dvousložkové metodě. Ta je definována následujícím vztahem:

$$E_{celkem} = E_L + E_T$$

kde:

E_{celkem} [kWh]

E_L [kWh]

E_T [kWh]

celková spotřeba energie z akumulátoru

spotřeba energie trakce z akumulátoru

spotřeba energie vedlejších pohonů
z akumulátoru

Z uvedeného vztahu vyplývá, že celková spotřeba energie z trakčního akumulátoru je definována součtem dvou složek. Konkrétně se jedná o složku,

kteřá určuje spotřebu energie pro pohyb daného vozidla („spotřeba energie trakce z akumulátoru“) a o složku určující spotřebu energie pro pomocné pohony („spotřeba energie vedlejších pohonů z akumulátoru“) jako jsou například zmíněné vytápění/klimatizace, osvětlení, kompresory. [2]

Zmíněná první složka z dvousložkové metody („spotřeba energie trakce z akumulátoru“) je definována tímto definičním vztahem:

$$E_L = e_L \cdot L$$

kde:

E_L [kWh]	spotřeba energie trakce z akumulátoru
e_L [kWh/km]	gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení
L [km]	ujetá vzdálenost

Spotřeba energie trakce z akumulátoru je definována jako součin výsledného gradientu trakční spotřeby a vzdálenosti mezi jednotlivými žst. (nebo zvolenými body stanovených pro výpočet). Zatímco veličina „ujetá vzdálenost“ je přesně stanovena, v případě gradientu trakční spotřeby tomu tak není. Zmíněný gradient stanovuje, kolik energie potřebuje jednotka BEMU pro ujetí jednoho kilometru (jednotky kWh/km). Jednu ze změn dané veličiny způsobuje odpor vzduchu, který narůstá s druhou mocninou rychlosti. Velikost odporu vzduchu se rovněž odvíjí od jeho hustoty, která se liší v jednotlivých ročních obdobích. Největší hodnoty dosahuje v zimě, naopak nejmenší v létě. Další změny gradientu jsou ovlivněny podélným sklonem a poloměry oblouků. V případě stanovení modelu se nejčastěji uvažuje s hodnotou gradientu střední roční, respektive s průměrnou hodnotou během celého roku. [2]

Druhou složku, z dvousložkové metody tvoří „spotřeba energie vedlejších pohonů z akumulátoru“, která má následující definiční vztah:

$$E_T = T_{p/c} \cdot P$$

kde:

E_T [kWh]	spotřeba energie vedlejší z akumulátoru
$T_{p/c}$ [h]	doba pobytu/cestovní doba
P [kW]	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení

Daná spotřeba je definována jako součin doby pobytu (vozidlo se nepohybuje) nebo cestovní doby (vozidlo v pohybu) a příkonu vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (příkon energie pro provoz pomocných pohonů). Výsledná veličina „spotřeba energie vedlejší z akumulátoru“ určuje, kolik energie je zapotřebí pro provoz pomocných pohonů za určitý čas. Hodnota příkonu je během roku proměnná (stejný případ, jako u „gradientu trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení“). Vozidlo spotřebovává více

energie v letních měsících, kdy je nutný intenzivní provoz klimatizace, a během zimních měsíců, kdy je naopak intenzivní vytápění. Naopak během jarních a podzimních měsíců není potřeba, aby bylo vozidlo v takové míře vytápěno či klimatizováno. Z toho tedy vyplývá, že spotřeba energie je nižší. Během výpočtů se nejčastěji uvažuje s hodnotou střední roční, respektive průměrnou. [2]

Uvedené veličiny představují základní princip pro prověření provozu jednotek BEMU z hlediska spotřeby energie z trakčního akumulátoru. Jak již ale bylo zmíněno, je zapotřebí uvažovat s proměnnými hodnotami během všech ročních období. Zároveň je zapotřebí během výpočtů uvažovat, zda se dané vozidlo pohybuje anebo stojí a zda vozidlo využívá energii z trakčního akumulátoru anebo trakčního vedení. Při užívání dané metody musí uživatel uvažovat například i s nočními odstavami, kdy se vozidlo nepohybuje, ale spotřebovává omezené množství energie pro pomocné pohony jednotky (temperování v zimním období).

5.5. Vstupní parametry pro sestavení modelu

Pro správné sestavení modelu je zapotřebí vhodně zvolit základní parametry. První věc, která se týká infrastruktury, je zapotřebí stanovit liniovou elektrizaci a cestovní doby či doby pobytu. V případě přítomnosti trakčního vedení musí být vhodně a především reálně stanovena hodnota příkonu umožňující obnovu energie v trakčním akumulátoru. Je důležité zmínit, že příkony se liší během nabíjení dynamického a statického (viz kapitola 5.1.). Od jednotlivých příkonů a možnosti nabíjení se odvíjejí doby pobytu a cestovní doby tak, aby při jakékoliv nepravidelné situaci bylo vozidlo nabito pro pokračování ve směru jízdy. [2]

Z hlediska samotného vozidla je důležité stanovit energii trakčního akumulátoru. Ta vychází z hodnot uvedených výrobcem k dané jednotce BEMU. Kapacita samotného akumulátoru s rostoucí délkou života klesá a zhruba po 15 letech dosahuje pouze 80 % původní hodnoty. Samotné vozidlo musí během celé délky své životnosti ujet předem stanovenou vzdálenost. Kromě nejvyšší možné hodnoty kapacity akumulátoru se stanovuje i nejnižší hodnota. Důvodem je, že se jedná o rezervu a zároveň časté úplné vybíjení akumulátoru na nulovou hodnotu může vést k jeho poškození. Většinou se minimální hodnota určuje jako 20 % ze snížené kapacity akumulátoru (80 %). Z tohoto důvodu se při návrhu pravidelného provozu modeluje s již sníženou kapacitou energie akumulátoru (nejčastěji s 60 % nominální hodnoty akumulátoru). Nadále je zapotřebí stanovit hodnoty pro příkon vedlejší spotřeby a gradient trakce (viz kapitola 5.4.). Na závěr musí být stanovena účinnost na vstupu energie do trakčního akumulátoru. [2]

5.6. Možnosti zpřesnění samotného modelu

Cílem základních výpočtů není stanovení přesné spotřeby energie, ale pochopení problematiky související s provozem jednotek BEMU v pravidelném

provozu. Samotnou dvousložkovou metodu, od které se odvíjí i možný dojezd při využívání energie z akumulátoru, je možné rozvíjet a zdokonalovat pro dosažení přesnějších výsledků. [2]

Hlavním možným rozšířením modelu je spotřeba energie během zrychlení či zpomalení jednotky. V případě zrychlení nastane rozdílná situace, kdy bude větší spotřeba energie z nulové rychlosti oproti zrychlení z rychlosti nenulové. Mezi další rozšíření se řadí výpočet se zpomalením. To je situace, kdy vozidlo nemusí odebírat energii pro pohon vozidla. Zároveň může využít rekuperační brzdění. V tomto případě si vozidlo vyrobí část energie a použije ji k obnově energie v trakčním akumulátoru. Na základě tohoto principu je možné prodloužit vzdálenost pro dojezd jednotek BEMU. [2]

Pro další zpřesnění výsledků je možné do výpočtů spotřeby energie zahrnout směrové a výškové vedení tratě a s tím související jednotlivé odpory (odporové síly působící na jedoucí vozidlo, respektive vlak). Také lze zpřesnit model o započítání odporu vzduchu (rozdílná hustota vzduchu vlivem počasí – teplota, vlhkost) a odpor valivý. Při výpočtech je možné taktéž zahrnout situaci, kdy může být jednotka BEMU nasazena na linku, kde část své jízdy bude odebírat energii z trakčního akumulátoru a ve zbylé části své trasy bude odebírat energii z trakčního vedení. Při příjezdu do stanice s liniovou elektrizací z tratě by byl trakční akumulátor okamžitě nabíjen limitním příkonem energie. Okamžitý velký příkon energie není příliš šetrný k trakčnímu akumulátoru, jelikož dochází k jeho poničení. Z tohoto důvodu by vozidlo mohlo využít možnost pozvolného nabíjení akumulátoru. Jednotky BEMU disponují takzvanými asistenčními systémy. Do softwaru vozidla je nahrána konkrétní trať s možnostmi nabíjení trakčního akumulátoru. Počítač si již následně hlídá odběr energie pro nabíjení. [2]

Samotné zpřesnění může uvažovat i s finančním hlediskem, tedy provozní náklady související s nákupem jednotek a následným provozem. Mohly by pak následně dojít k ekonomické analýze, zda pro určenou trať je vhodnější nákup jednotek BEMU anebo výstavba trakčního vedení a následný provoz vozidel závislé trakce. Problém takového porovnání však spočívá v tom, že se liší investor infrastruktury (pevná trakční zařízení) a vozidel (dopravce, respektive zprostředkovaně objednatel veřejné dopravy).

4. Závěr

Tento článek byl vytvořen pro představu základních požadavků spojených s provozem jednotek BEMU (battery electric multiple unit) v reálném provozu.

Nejprve ale byla představena problematika spotřeby energie v dopravě, především v dopravě železniční a s tím spojená produkce škodlivých látek do ovzduší. V článku dále pak byly porovnány účinnosti vozby trakce parní, nezávislé a závislé. Nejvyšší hodnoty účinnosti dosahují vozidla s trakčním elektromotorem a odběrem energie z trakčního vedení oproti vozidlům, která jako primární zdroj energie využívají fosilní paliva. Právě během spalování fosilních paliv dochází k produkci oxidu uhličitého a dalších škodlivých exhalací, které jsou nežádoucí.

Následně byly uvedeny možnosti náhrady vozidel nezávislé trakce vozidly s alternativními pohony. Na území České republiky by se mělo především jednat o vozidla s trakčními akumulátory.

Zároveň byl v dalších kapitolách zhodnocen princip provozu jednotek BEMU, a to především z hlediska možnosti nabíjení akumulátoru, kdy nejvhodnějším bodem je elektrizovaná železniční stanice (nabíjení statické) anebo mezistaniční úsek (nabíjení dynamické) se střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz. Před nasazením jednotek do pravidelného provozu je zapotřebí provést analýzu, zda je výhodnější provoz a nákup jednotek BEMU (o 30 % až 50 % dražší než jednotka EMU, electric multiple unit) anebo výstavba trakčního vedení (zhruba 7 mil. Kč za kilometr jednokolejné trati) a následný provoz jednotek EMU. Z poslední stanice, kde mohou být vozidla nabíjena, je ve většině případů garantován dojezd na vzdálenost 40 km až 60 km (pro jednu cestu), v případě možnosti nabíjení v obrátové stanici se dojezd prodlužuje na dvojnásobek.

Na závěr byl uveden základní princip výpočtu spotřeby energie sloužící pro modelaci spotřeby energie z trakčního akumulátoru. Uvedené vztahy vycházejí z takzvané dvousložkové metody, která spočívá ve sčítání energie pro trakci, respektive energie potřebné pro pohyb vozidla a pro příkon pomocných pohonů (vytápění/klimatizace, kompresory, osvětlení). Cílem této metody není stanovení přesné hodnoty spotřeby energie. Přesnější stanovení hodnot by mohlo nastat při zdokonalování modelu. Aktuální spotřeba se nyní může lišit při zrychlení či zpomalení vozidla anebo různých směrových a výškových parametrech trati. Orientační hodnota ale například může stanovit, jak velká spotřeba energie může nastat během uvážnutí vozidla v mezistaničním úseku spojeném s nepravidelností a tím i následným prověřením dojezdu do místa s možností nabíjení.

Literatura

- [1] POHL, Jiří: Bezemisní železniční vozidla a infrastrukturní energetické zázemí pro jejich provoz, prezentace pořádaná Drážní společností na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze 12. 12. 2022 [cit. 2023-08-01].
- [2] KREJČÍ, Jiří: Možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy. Praha, 2023. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta dopravní. Vedoucí práce doc. Ing. Lukáš Týfa, Ph.D. [cit. 2023-08-01]
- [3] ŠKAPA, Petr: Železniční doprava, učební text, Fakulta strojní Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007 [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zdopr/01_ZD.pdf

[4] JAVOŘÍK, Tomáš: Energetická náročnost dopravy, prezentace v rámci předmětu Doprava a životní prostředí na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze [cit. 2023-08-01].

Digitální a zelená železniční infrastruktura Projekt DIGRI – Redukce hluku a vibrací

Ing. Bc. Lenka Lomoz, Ph.D.

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7/2077, 166 29, Praha 6 - Dejvice

e-mail: lenka.lomozk@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Článek stručně představuje podnikatelský záměr připravovaného projektu „Digitální a zelená železniční infrastruktura“ podaného v rámci operačního programu Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu. Článek se podrobněji zaměřuje na technologický záměr v rámci zelené transformace Redukce hluku a vibrací, který je blízký autorovi článku. Jsou popsána stěžejní témata, počáteční stav a směr jakým je možné se ubírat.

Klíčová slova

Zelená železniční infrastruktura, cirkulární ekonomika, strukturální hluk, vibrace, predikce hluku a vibrací.

Digital Green Railway Infrastructure DIGRI Project – Noise and Vibration reduction

Abstract

The article briefly describes the business plan of the upcoming "Digital Green Railway Infrastructure" project submitted as part of the operational program Technology and Applications for Competitiveness supported by the Ministry of Industry and Commerce. The article focuses in more detail on the technological intention within the framework of the green transformation Noise and vibration reduction, which is close to the author of the article. The main topics, the initial state and the direction in which it is possible to go are described.

Keywords

Green railway infrastructure, circular economy, structural noise, vibration, noise and vibration prediction.

1. Projekt „Digitální a zelená železniční infrastruktura“

V rámci projektu Digitální a zelená železniční infrastruktura (DIGRI) jsou v technologické oblasti podporované aktivity zaměřující se na vytváření a implementaci strategií směřujících k digitální a zelené transformaci průmyslu. Železniční infrastruktura, její správa a provoz, umožňuje uplatnění využití moderních technologií a digitalizace zaměřené na zelenou transformaci. V projektu DIGRI bylo celkem vydefinováno šest technologických oblastí, z toho jsou tři zaměřené na samotnou digitalizaci a implementaci moderních technologií a tři se věnují oblasti zelené transformaci.

Konkrétně se jedná v oblasti digitalizaci o tyto technologie:

- Zavedení technologie BIM – Building Information Modeling na železnici
Tato technologická oblast souvisí s digitalizací projektové přípravy železničních staveb s cílem zefektivnit nejen vlastní práci na projektu.
- Komunikační systém FRMCS – Future Railway Mobile Communication System
Tato technologie umožní propojení jednotlivých subsystémů, sledování železniční infrastruktury v průběhu celého životního cyklu atd.
Digitalizace správy železniční infrastruktury
Jedná se o zavedení nového komunikačního systému 5G pro efektivní řízení a zabezpečení jízdy vlaku po železniční infrastruktuře.

V zelené transformaci se jedná o tyto technologie:

- Cirkulární ekonomika na železničních stavbách
Jedná se o oblast efektivního druhotného využívání odpadových materiálů ze železničních staveb – oběhové hospodářství. Oběhové hospodářství je jedním z cílů „Zelené dohody“ Evropské komise.
- Redukce hluku a vibrací
Důležitost této technologie se zvyšuje v souvislosti s přípravou výstavby vysokorychlostních tratí v České republice, neboť intenzita hluku a vibrací se zvyšuje při vysokých rychlostech vlaku.
- Alternativní zdroje napájení
Jedná se o oblast využívání alternativních zdrojů napájení. Pro redukcí uhlíkových emisí na železnici je nutné provést redukcí využívání motorové dieselové trakce. Jedním ze základních nástrojů je elektrifikace, nicméně ta je investičně náročná a na některých vedlejších tratích se nevyplatí. Proto se nabízejí další alternativní zdroje napájení např. baterie, vodík nebo kombinace různých těchto zdrojů napájení. [1]

2. Redukce hluku vibrací

V rámci oblasti „Redukce hluku a vibrací“ byly představeny následující technologie (témata), kterými je nutné se zabývat z hlediska dlouhodobého strategického železničního výzkumu a edukace v daném oboru. Námety vzešly v rámci doporučení z řady odborníků akustiků, projektantů železničních staveb, zaměstnanců zdravotních ústavů apod.

Mezi stěžejní témata lze zařadit:

- problematiku přenosu vibrací z provozu vysokorychlostních tratí (VRT) zemními konstrukcemi na velké vzdálenosti a vznik strukturálního hluku,
- problematiku negativních dopadů Rayleighova vlnění u vysokorychlostních tratí,
- komplexní řešení protihlukových opatření v rámci projektové přípravy vysokorychlostních tratí,
- vývoj metodiky navrhování antivibračních prvků v konstrukci železniční trati,
- zkvalitnění vstupních dat pro predikci hluku v rámci strategického hlukového mapování.

Výčet těchto témat nemusí být konečný, může se vyvíjet a reflektovat na aktuální požadavky, které mohou nastat i v průběhu řešení projektu.

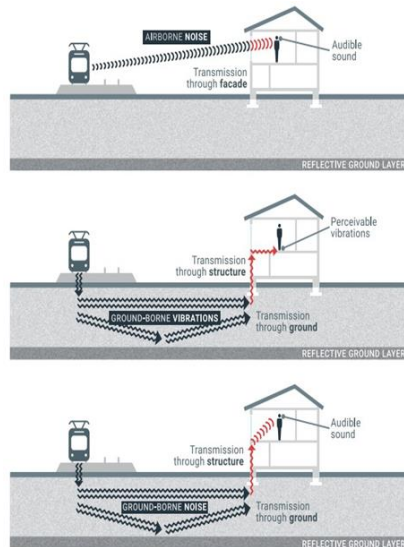
Vybrané jednotlivá témata technologie „Redukce hluku a vibrací“ jsou plně v souladu s dokumentem „Rail strategic Research and Innovation Agenda“ vydaný Evropským poradním orgánem pro železniční výzkum a inovace. Reflektují současné problémy nejen v ČR, ale i v EU v oblasti hlukové problematiky z (nejen) kolejové dopravy.

2.1. Problematika vzniku strukturálního hluku

Koncepční návrh VRT na území ČR je díky morfologickým a urbanistickým předpokladům veden z pohledu šíření vibrací v relativní těsné blízkosti rozsáhlých sídelních celků. Vibrace vznikající provozem kolejové dopravy prostupují horninovým prostředím na velké vzdálenosti a mohou při kontaktu se stavební konstrukcí tuto konstrukci rozkmitat. Tato konstrukce pak může tyto vibrace emitovat v podobě tzv. strukturálního hluku (Obr. 1). Zkušenosti s touto problematikou ze zahraničí nelze jednoduše generalizovat a přebírat řešení ve stejném rozsahu. Je to především dáno jinou geologickou stavbou podloží českého masívu a samotným technickým řešením návrhu VRT.

Problematiku přenosu vibrací z provozu VRT lze v budoucnu sledovat ve dvou rovinách, a to prostřednictvím predikce šíření strukturálního hluku a stanovení doporučených opatření pro případná řešení problému se strukturálním hlukem. Je nutné najít a definovat postup pro predikci a hodnocení vibrací generovaných provozem kolejové dopravy pro potřeby hodnocení úrovně strukturálního hluku v chráněném vnitřním prostoru vibracemi zasažených staveb. Na základě stanovení matematicko-analytického postupu lze hledat cesty k určení, zda bude či nebude mít objekt problém se strukturálním hlukem. Na základě této predikce je žádoucí navrhnout účinná řešení zamezující šíření těchto vibrací (nejlépe u zdroje), které mohou vést ke vzniku strukturálního hluku v budovách. Přínosem zavedení těchto postupů identifikace strukturálního hluku bude úspora

značných finančních prostředků (které by bylo nutné na straně železniční infrastruktury či plánované stavby vynaložit, pokud by byla stavba dotčena strukturálním hlukem) díky prevenci a včasnému vytipování staveb železniční infrastruktury nebo objektů v jejím okolí s potenciálním ohrožením strukturálním hlukem.

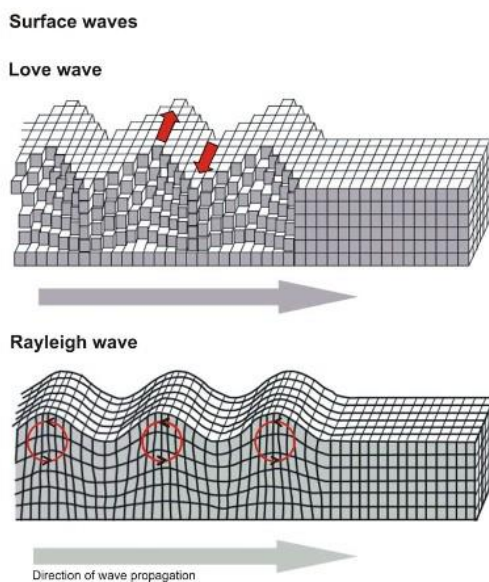


Obr. 1. Přenosové cesty hluku a vibrací horninovým prostředím – vznik strukturálního hluku [2]

2.2. Negativní dopady Rayleighova vlnění

Jedná se o specifickou problematiku úzce svázanou s provozem vlaků jedoucích vysokými rychlostmi. V zahraničí je daná problematika Rayleighova vlnění široce sledována, zejména v Anglii (výstavba High Speed 2) a Švédsku. Podstata problematiky spočívá v jevu, který nastane, pokud se rychlost jízdy vlaku přibližně rovná kritické rychlosti zeminy. Při tom dochází k výraznému nárůstu velikosti výchylek vlnění, které se šíří do okolí trati a může dojít k poškození samotné infrastruktury a staveb v jejím okolí (př. obec Ledsgard – Švédsko). Znázornění Rayleighova vlnění je uveden na obr.2. V ČR se této problematice věnuje Katedra železničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze.

V rámci problematiky Rayleighova vlnění u VRT je nutné se zaměřit na rozšíření povědomí o této problematice, vyvolat jednání vedoucí k stanovení vhodné metodiky pro predikci rizikových oblastí a stanovení metodiky pro návrh konstrukce železničního spodku za účelem eliminace negativních dopadů tohoto jevu na infrastrukturu VRT. V dokumentu „Technicko-provozní studie VRT“ prezentovaném Správou železnic je doporučeno se danou problematikou zabývat.



Obr. 2. Znáznění povrchových vln [3]

2.3. Komplexní řešení protihlukové ochrany

Problematika protihlukových opatření (PHO) v síti Správ železnic je na běžné konvenční trati řešena např. protihlukovými stěnami (PHS), zemními valy, nízkými protihlukovými clonami a kolejnicovými absorbéry. V rámci projektové přípravy VRT a návrhu PHO je nutné zohlednit rozdílnou polohu zdrojů hluku vysokorychlostních vlaků a samotnou jejich rychlost. Dominantním hlukem v této situaci je aerodynamický. Dalším zdrojem hluku se jeví samotný kontakt sběrače s trakčním vedením. Jedná se především o vysokofrekvenční hluk vznikající ve vyšších výškách. Tento významný zdroj hluku výškou svého vzniku výrazně převyšuje výšku běžně navrhovaných PHS (cca 4 m). Současně vzdálenost umístění PHS od osy krajní koleje je oproti konvenční trati větší. Kombinace těchto podmínek ovlivňuje účinnost PHS.

Pro komplexní řešení protihlukových opatření během projektové přípravy VRT a v kombinaci výše popsaných podmínek je žádoucí hledat nové možnosti tvarů a umístění PHS v okolí VRT. Cílem je vytvoření metody návrhu PHO u VRT při zohlednění všech zdrojů hluku.

2.4. Navrhování antivibračních prvků

Zkoušení a laboratorní ověřování antivibračních rohoží (AVR) se v rámci ČR provádí na základě platných OTP Antivibrační rohože v tělese železničního spodku, OTP č.j. 1168 / 2009 – S [4]. Dále v roce 2021 vešla v platnost norma

ČSN EN 17282 Železniční aplikace - Infrastruktura - Rohože pod šterkovým ložem [5].

Naproti tomu v současné době není v ČR zavedena jednotná metodika návrhu antivibračních prvků pro použití u kolejových staveb, zejména antivibračních rohoží (AVR), které se vyrábějí v široké škále rozměrů a technických parametrů (např. tloušťka, objemová hmotnost, plošná tuhost) (Obr. 3). Projektant na základě průzkumu obdrží požadavek na umístění AVR, přičemž nemá vodítko, jak stanovit konkrétní parametry této rohože pro danou situaci.



Obr. 3. Antivibrační rohože

V oblasti navrhování antivibračních prvků do konstrukci železniční trati je vhodné se zaměřit na vývoj jednotné metodiky pro navrhování antivibračních prvků a volbu parametrů antivibračních rohoží pro danou situaci. Po vypracování příslušné metodiky se zpřesní parametry návrhu, dojde k jeho optimalizaci z pohledu nákladů na výstavbu, trvanlivosti řešení a zlepšení ochrany životního prostředí.

2.5. Zkvalitnění vstupních dat pro predikci hluku

V rámci EU probíhá na základě směrnice 2002/49/ES (Environmental Noise Directive – END) v pětiletých cyklech dlouhodobý monitoring hluku prostřednictvím tzv. strategického hlukového mapování (SHM). Jedná se o proces výpočtu akustické situace v okolí hlavních významných zdrojů hluku za pomoci specializovaného výpočetního software. Na proces SHM navazují tzv. akční plány, kde jsou již navrhována konkrétní opatření snižující hluk. Česká republika má povinnost SHM zpracovávat a výsledky reportovat orgánům Evropské unie. V rámci výpočtů byla pro predikci hluku definována

jednotná výpočtová metodika CNOSSOS. Kvalita vstupních parametrů, které jsou importovány do této metodiky, výrazně ovlivňují validaci výsledků. Sběr a stav těchto vstupních parametrů jako je např. stav kolejové konstrukce (tramvajové a železniční tratě), vlnkovitost a drsnost kolejnic, akustická katalogizace kolejových vozidel (př. tramvajová vozidla) a jejich kombinací je nutné provádět a soustavně sledovat. Dosud tyto informace nejsou uceleny, jsou spíše kusé, měřené na vybraných úsecích a generalizované na celkový požadovaný rozsah.

Pro zkvalitnění vstupních dat pro predikci hluku je nutné se věnovat vývoji metod pro akustické monitorování kontinuální mikrogeometrie jízdní dráhy a kolejových vozidel pro akustickou identifikaci relevantních závad v požadovaném rozsahu, zpřesnění a pravidelné aktualizaci vstupních parametrů nutných pro SHM.

3. Závěr

Cílem technologického záměru Redukce hluku a vibrací je především rozšíření povědomí o daných tématech, vyvolat debatu, podílet se na edukaci projektantů v rámci výše vyjmenovaných a jednotlivě popsanych témat. Dále je nutné vyvolat jednání se správcem infrastruktury za účel přípravy potřebných manuálů, metodik pro základní řešení těchto problematik, stejně tak předání podkladů grantovým agenturám pro vypisování podpurných programů vědy, výzkumu a inovací. Další úlohou projektu DIGRI bude sledování aktuálního vývoje v daném okruhu témat v zahraničí, přenášet poznatky do českých podmínek.

Překážkami v naplnění výše zmíněných cílů může nastat v neznalosti rizika spojené s existencí jednotlivých témat a obecně podceňování dané problematiky. Malá podpora v grantovém výzkumu.

Literatura

- [1] Podnikatelský záměr projektu DIGRI, Technologická platforma Interoperabilita železniční infrastruktury, 2023.
- [2] Railway induced vibration, State of the art report UIC, dostupné z: <https://uic.org/IMG/pdf/uic-railway-induced-vibration-report-2017.pdf> [online 04.09.2023]
- [3] Přírodní katastrofy a environmentální hazardy, dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/~herber/quake.htm> [online 04.09.2023]
- [4] OTP Antivibrační rohože v tělese železničního spodku, OTP č.j. 1168 / 2009 – S, SŽDC, 2009
- [5] ČSN EN 17282 Železniční aplikace - Infrastruktura - Rohože pod štěrkovým ložem, ČMI, 2021

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován za podpory projektu SVK 12/23/F1. Dále za podpory Technologické platformy Interoperabilita železniční infrastruktury.

Výsledky analýzy laboratorního vybavení na Fakultě stavební ČVUT v Praze za účelem výzkumu namáhání a deformace konstrukce vysokorychlostní železniční trati

Ing. Jiří Pospíšil¹, Ing. Vít Lojda, Ph.D.²

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7/2077, 166 29, Praha 6 - Dejvice

e-mail_1: jiri.pospisil.1@fsv.cvut.cz,

e-mail_2: vit.lojda@cvut.cz

Abstrakt

V České republice se podle principů převzatých z Francie pracuje na přípravě výstavby vysokorychlostních železničních tratí s rychlostí až $320 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Součástí přípravy je i laboratorní výzkum prováděný na modelech konstrukce vysokorychlostní železniční trati, které se za současného sledování deformace silově namáhají, což oproti konvenčním tratím vyžaduje specifické podmínky zatěžování. Při simulování pojezdů vlakových souprav cyklickým silovým zatěžováním modelu je nutné, aby toto zatížení dosahovalo hodnoty zatěžovací frekvence a amplitudy síly odpovídající příslušné vlakové soupravě a její rychlosti. Tento příspěvek prezentuje výsledky projektu prověřujícího možnosti laboratorního vybavení Fakulty stavební ČVUT v Praze ve smyslu budoucího výzkumu a modelování namáhání konstrukce železniční trati při rychlostech projíždějících souprav vyšších než $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Klíčová slova

Vysokorychlostní trať, hydraulický lis, zatěžovací frekvence, zatěžovací síla, zatěžovací experiment.

Results of the analysis of the laboratory equipment at the Faculty of Civil Engineering of the CTU in Prague for the purpose of researching the stress and deformation of the structure of the high-speed railway line

Abstract

In the Czech Republic, the process of preparing the construction of high-speed railway lines with speeds of up to $320 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ is taking place according to the principles adopted from France. Part of the preparation is also laboratory research performed on models of the construction of a high-speed railway line, in which force loading of models is carried out with monitoring of deformation, what requires specific loading conditions compared to conventional lines. When simulating the movement of train sets using cyclic force loading, it is necessary that this load reaches the value of the load frequency and force amplitude corresponding to the respective train set and its speed. This paper presents the results of a project focusing on the possibilities of the laboratory equipment of the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague in the sense of future research and modelling of the loading in the structure of the railway line at speeds of passing sets higher than $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Keywords

High-speed railway line, hydraulic press, loading frequency, loading force, loading experiment.

1. Úvod

Jedna z možností simulování pojezdů náprav vlakových souprav po konstrukci železniční trati v laboratoři je zatěžování modelu takové konstrukce cyklickým silovým zatěžováním. Při simulování pojezdů náprav vlakových souprav po konstrukci vysokorychlostní železniční trati (VRT) je nutné, aby laboratorní hydraulický lis dosahoval hodnot zatěžovací frekvence a amplitudy odpovídajících rychlosti vlaku více než $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Při dosavadní zkušenosti Katedry železničních staveb bylo zjištěno, že při vyšších hodnotách zatěžovací frekvence nebo při relativně nízké deformační odolnosti modelu je možné hydraulické zatěžovací lisy v prostorách laboratoří Fakulty stavební ČVUT v Praze používat jen v režimu, který vyžaduje snížit hodnotu zatížení nebo zatěžovací frekvence. V oboru VRT jsou však vedle požadavků na rychlost vlaku také vysoké nároky na tuhost konstrukce železniční trati, a tak lze předpokládat, že hydraulický lis může nároky na provádění laboratorních zkoušek splnit. Cílem tohoto projektu tedy bylo tuto hypotézu prověřit.

2. Uvažované vlakové soupravy

V samotném úvodu řešení projektu bylo po rešerši internetových i knižních zdrojů a po konzultaci s odborníky v oboru vývoje kolejových vozidel zjištěno, že v České republice neexistuje předpoklad o konkrétních typech vlakových souprav pro budoucí využití v provozu na VRT a že existuje pouze koncepce provozu souprav zařaditelných do dvou různých kategorií dle rychlosti a hmotnosti na nápravu, kterou přehledně uvádí Správa železnic, s. o., na svých webových stránkách [1]. Tyto kategorie byly využity i pro účely řešení tohoto projektu a jsou následující:

- 1. kategorie: maximální rychlost $320 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, maximální hmotnost na nápravu 17,0 t,
- 2. kategorie: maximální rychlost $230 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, maximální hmotnost na nápravu 22,5 t.

Po konzultaci s odborníky ze společnosti Siemens Mobility, s. r. o., tedy byly pro potřeby projektu uvažovány následující čtyři typy vlakových souprav, jejichž technické parametry potřebné pro výpočet jsou veřejně dostupné:

- lokomotiva řady 163 [2] + 7 vozů řady Bdmpee [3] (rychlost $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, označeno jako „rychlík“),
- lokomotiva Siemens Vectron [4] + 7 vozů řady Bmpz [5] (rychlost $230 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, označeno jako „railjet“),
- jednotka ICE 3 (MS) BR 407 [6] (rychlost $320 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, označeno jako „ICE 3“),
- jednotka ICE 4 (7-tlg.) BR 412 [6] (rychlost $250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, označeno jako „ICE 4“).

Pro uvažované vlakové soupravy pak bylo stanoveno ekvivalentní cyklické silové zatížení o hodnotách zatěžovacích frekvencí v [Hz] a silovém rozsahu v [kN] odpovídajícím jejich rychlostem a technickým parametrům (rozvory náprav, vzdálenosti otočných čepů, hmotnosti na nápravu apod.). Souprava

označená jako „rychlík“ byla uvažována jako referenční za účelem ověření, zda se vypočtené hodnoty shodují s dosavadní praxí pracovníků Katedry železničních staveb.

2.1. Hodnoty zatěžovacích frekvencí a silový rozsah cyklického zatížení

Při výpočtu zatěžovacích frekvencí bylo postupováno obdobně jako v disertační práci Víta Lojdy [7] na straně 47, tedy že celkový počet náprav vlakové soupravy, která v daném časovém úseku projede danou rychlostí referenčním profilem železniční trati, odpovídá celkovému počtu zatěžovacích cyklů působících v daném časovém úseku na konstrukci. Postup výpočtu silového rozsahu cyklického zatížení byl konzultován s kolegy ze společnosti Siemens Mobility s.r.o. a na základě jejich dlouhodobé zkušenosti s podobnými výpočty zatížení konstrukcí železničních mostů byla hodnota amplitudy zatěžovací síly na kontaktu kolo – kolejnice uvažována pouze jako tíha vozu dělená počtem náprav a dělená dvěma (na jednu nápravu připadají dvě kola) a např. vliv ohybové tuhosti kolejové jízdní dráhy nebo dynamického součinitele byl s ohledem na přesnost výpočtu a způsob aplikace výsledků zanedbán. V případě vozů pro cestující byla uvažována jejich plná obsazenost sedícími cestujícími o hmotnosti 80 kg. Tato síla pak byla ještě redukována součinitelem roznosu kolového zatížení [7] na jednotlivé pražce při dobré kvalitě podloží (součinitel ložnosti $C = 5 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$). Stanovené hodnoty zatěžovacích frekvencí a silový rozsah cyklického zatížení jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Hodnoty zatěžovacích frekvencí a silový rozsah cyklického zatížení pro uvažované vlakové soupravy.

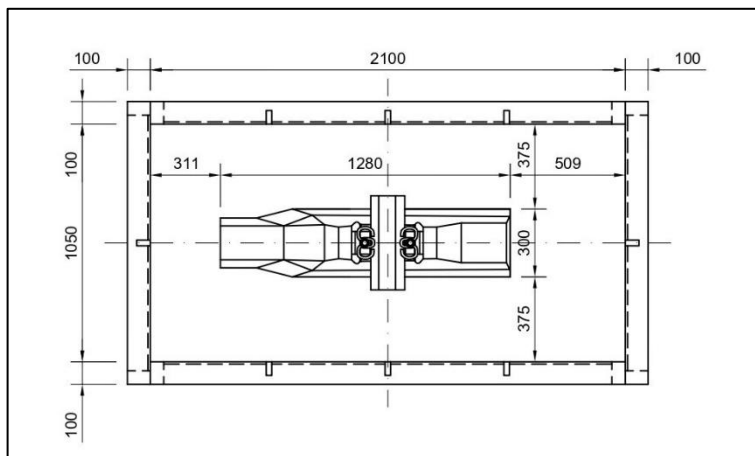
Vlaková souprava	Zatěžovací frekvence [Hz]	Silový rozsah zatížení [kN]
Rychlík (rychlost 140 km·h ⁻¹)	6,17	30,4
Railjet (rychlost 230 km·h ⁻¹)	10,05	32,0
ICE 3 (rychlost 320 km·h ⁻¹)	14,37	23,1
ICE 4 (rychlost 250 km·h ⁻¹)	8,37	24,2

3. Prověření laboratorního vybavení

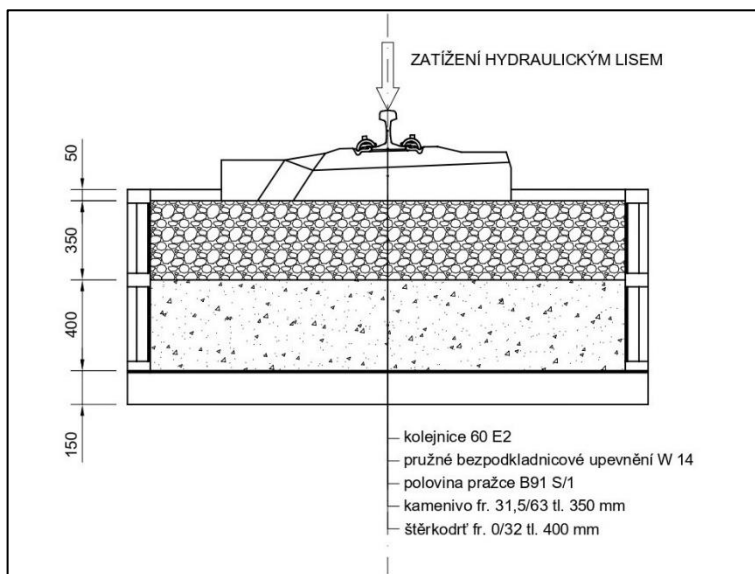
K provádění laboratorních zatěžovacích experimentů Katedra železničních staveb nejčastěji používá hydraulický lis Inova, typ AH-250-200-V1, kterým simuluje zatížení od vlakových souprav projíždějících rychlostí až do 160 km·h⁻¹. V rámci přípravy laboratoře pro výzkum konstrukce VRT byl lis podroben zatěžování laboratorního modelu, které simulovalo průjezdy vlakových souprav o vysokých rychlostech. Experiment byl proveden na vystavěném modelu konstrukce železniční trati o vysoké deformační odolnosti, která odpovídá konstrukci VRT.

3.1. Model vysokorychlostní železniční trati

Podoba modelu konstrukce železniční trati byla zvolena tak, aby co nejlépe odpovídala reálné konstrukci VRT a současně byl model tvořen materiály, které měla Katedra železničních staveb v době zatěžovacího experimentu k dispozici. Pro výstavbu modelu byl použit zkušební box o vnitřních rozměrech 2100 mm, 1050 mm a 800 mm, který Katedra železničních staveb běžně využívá pro potřeby svých laboratorních měření. Schéma zkušebního modelu konstrukce železniční trati je zobrazeno na obr. 1 a obr. 2.



Obr. 1. Schéma modelu konstrukce železniční trati pro ověření laboratorního vybavení, půdorys.



Obr. 2. Schéma modelu konstrukce železniční trati pro ověření laboratorního vybavení, podélný řez.

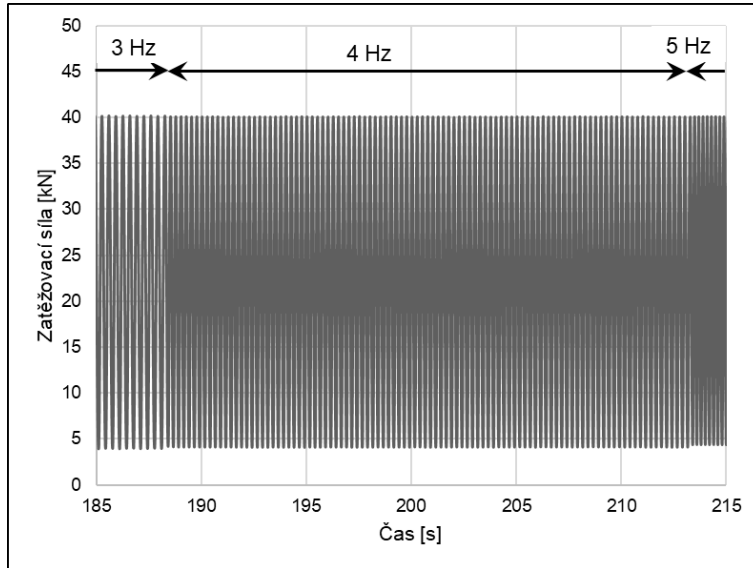
Spodní vrstva štěrkodrti o tloušťce 400 mm byla hutněna vibrační deskou o rozměrech 400 mm krát 300 mm a hmotnosti 91 kg po čtyřech mezivrstvách, každá mezivrstva po dobu 10 minut. Vrstva kameniva o tloušťce 350 mm byla hutněna pneumatickým hutnicím zařízením po dvou mezivrstvách, každá vrstva po dobu 10 minut.

Na vrstvě štěrkodrti byly dle normy ČSN 73 1006 [8], přílohy B, provedeny dvě statické zatěžovací zkoušky, které byly rovnoměrně rozmístěné po jejím povrchu. Požadavek na deformační odolnost tělesa železničního spodku VRT v České republice doposud není veřejně dostupný, nicméně příloha 6 předpisu SŽ S4 [9], který je platný pro železniční spodek konvenčních železničních tratí v České republice, uvádí pro tratě s rychlostí $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ požadavek na minimální hodnotu modulu přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku 90 MPa. Vzhledem k výsledkům statických zatěžovacích zkoušek převyšujícím hodnotu modulu přetvárnosti 106 MPa lze zkoušený model považovat za konstrukci odpovídající reálné VRT.

3.2. Zatěžovací experiment

Na postaveném modelu konstrukce železniční trati byl proveden zatěžovací experiment, kterému předcházelo konsolidační zatěžování. V rámci konsolidačního zatěžování byla na model nejprve aplikována statická síla o velikosti 40 kN po dobu 60 sekund. Konsolidační zatěžování dále pokračovalo cyklickým silovým zatížením modelu s rozsahem síly od 4 kN do 40 kN a zatěžovací frekvencí 3 Hz po dobu 330 sekund.

Samotný zatěžovací experiment pak byl rozdělen do dvou fází. V první fázi bylo s ohledem na stanovené hodnoty silového rozsahu zatížení pro jednotlivé soupravy (viz tab. 1) aplikováno na model cyklické silové zatížení s rozsahem síly od 2 kN do 30 kN. Zatěžovací frekvence byla zpočátku nastavena na hodnotu 1 Hz a postupně byla s krokem 1 Hz zvyšována až na hodnotu 15 Hz. Druhá fáze experimentu byla obdobná, avšak s tím rozdílem, že silový rozsah cyklického zatížení aplikovaného na model byl s ohledem na průběžné výsledky první fáze od 4 kN do 40 kN. Část druhé fáze zatěžovacího experimentu je ilustrována na obr. 3.



Obr. 3. Část druhé fáze zatěžovacího experimentu.

V první i ve druhé fázi experimentu byla v každém kroku zvýšení zatěžovací frekvence sledována přesnost hydraulického válce a chování celého modelu konstrukce železniční trati, tedy zda je hydraulický válec schopen dosáhnout daného silového rozsahu zatížení při předepsané hodnotě zatěžovací frekvence (a tedy rychlosti jeho pohybu). Bylo zjištěno, že při tuhosti modelu konstrukce železniční trati odpovídající tuhosti reálné konstrukce VRT je hydraulický lis Inova, typ AH-250-200-V1, schopen při předepsané frekvenci 15 Hz bez znatelných chyb a nepřesností dosáhnout nejen menšího, ale také většího ze zmíněných silových rozsahů zatížení (od 4 kN do 40 kN), které významně převyšuje hodnoty stanovené pro jednotlivé vlakové soupravy (viz tab. 1).

4. Závěr

Cílem projektu bylo prověření dostupného laboratorního vybavení Fakulty stavební ČVUT v Praze pro potřeby výzkumu v oblasti namáhání a deformace konstrukce VRT. Za tímto účelem byly vyhledány potřebné informace o uvažovaných vlakových soupravách a byly stanoveny zatěžovací frekvence a silový rozsah náhradního cyklického zatížení, které odpovídají průjezdu uvažované vlakové soupravy referenčním profilem železniční trati danou rychlostí. Toto zatížení pak bylo aplikováno na postavený laboratorní model konstrukce železniční trati, přičemž bylo zjištěno, že i při předepsané zatěžovací frekvenci 15 Hz je hydraulický lis schopen s dostatečnou přesností dosáhnout silového rozsahu zatížení od 4 kN až do 40 kN.

Z uvažovaných vlakových souprav (viz tab. 1) jsou kritické soupravy „railjet“ a „ICE 3“. Soupravě „railjet“ s nejvyšší hodnotou silového rozsahu zatížení 32,0 kN odpovídá zatěžovací frekvence o hodnotě 10,05 Hz, soupravě „ICE 3“

s nejvyšší hodnotou zatěžovací frekvence 14,37 Hz pak silový rozsahu zatížení o hodnotě 23,1 kN. Z výsledků zatěžovacího experimentu je tedy patrné, že je hydraulický lis běžně využívaný Katedrou železničních staveb využitelný i pro potřeby výzkumu v oblasti VRT.

Literatura

- [1] Vozidla a provoz na VRT [online]. Správa železnic, s. o., 2022. [vid. 2022-12-07]. Link: <https://www.spravazeleznic.cz/vrt/priprava-a-technologie/vozidla-a-provoz>
- [2] Atlas lokomotiv, 163, 162, E499.3 [online]. ŽelPage, 2022. [vid. 2022-12-07]. Link: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-163.html>
- [3] Atlas vozů, vůz Vůz CZ-ČD Bdmpee [online]. ŽelPage, 2022. [vid. 2022-12-07]. Link: <https://www.atlasvozu.cz/rada/cd/5-Bdmpee233.html>
- [4] SIEMENS AG [online]. Vectron 230 km/h. Travel high speed flexibly across Europe. 2022. [vid. 2022-12-07]. Link: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c0d82542-6247-4cad-925a-c4a6d260530d/mo-rs-t10070-00-7600-vectron-datasheet-230kmh.pdf>
- [5] Atlas vozů, vůz Vůz CZ-ČD Bmpz [online]. ŽelPage, 2022. [vid. 2022-12-07]. Link: <https://www.atlasvozu.cz/rada/cd/231-Bmpz891.html>
- [6] DEUTSCHE BAHN AG [online]. Fahrzeuglexikon für den Verkehr. 2021. [vid. 2022-12-07]. Link: https://download.data.deutschebahn.com/static/datasets/fahrzeuglexikon/Fahrzeuglexikon_2021_06.pdf
- [7] LOJDA, Vít. Výzkum a uplatnění plastových příčných podpor v železniční trati. Praha, 2020. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra železničních staveb.
- [8] ČSN 73 1006. Kontrola zhutnění zemin a sypanin. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [9] SŽ S4. Železniční spodek. Praha: Správa železnic, s. o., 2021.

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován v rámci interního grantového projektu SGS22/042/OHK1/1T/11.

Analýza parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod s auty.

Ing. Jakub Seidl¹

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4, 166 00, Praha 6 - Dejvice

e-mail_1: jakub.seidl@fs.cvut.cz,

Abstrakt

Tento článek popisuje dílčí části výzkumu návrhu úpravy čel tramvají pro snížení následků nehod na autech. První kapitola článku vysvětluje čtenáři problematiku nehodovosti tramvají s auty a shrnuje dílčí závěry z již provedeného výzkumu, které objasňují motivaci k výzkumu popsaného v tomto článku. Druhá část článku je věnována analýze parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod na autech.

Klíčová slova

Auto, biomechanické kritérium 3 ms, kompatibilita vozidel, nehoda, tramvaj.

Analysis of parameters of deformation elements of trams on the consequences of accidents with cars.

Abstract

This article describes parts of the research on the design of tram fronts modifications to reduce the consequences of accidents on cars. The first chapter of the article explains to the reads the issue of tram-car crashes and summarises partial conclusions from research already carried out, which clarify the motivation for the research described in this paper. The second chapter of the article is devoted to the analysis of the parameters of the deformation elements of trams on the consequences of accidents on cars.

Keywords

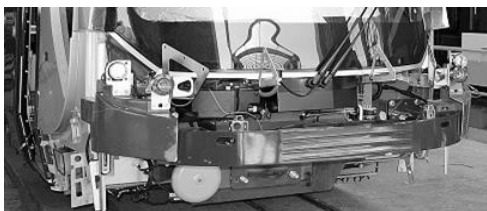
Car, biomechanical criterion 3ms, vehicle compatibility, accident, tram.

1. Úvod

Moderní tramvajová doprava, zajišťována v dnešní době především částečně nebo plně nízkopodlažními vozidly, patří k jednomu ze základních pilířů městské hromadné dopravy každého moderního města s počtem obyvatel nad 100 tisíc. Tramvajová doprava je nejčastěji využívána k přepravě velkého počtu cestujících z odlehlejších částí města do jeho centra. Z důvodu historické zástavby většiny evropských měst není možné vést tramvajovou dopravu po samostatném tělese odděleném od ostatních účastníků silničního provozu a tím zcela eliminovat riziko vzniku dopravních nehod. [1]

Z důvodu potřeby změny směru jízdy dochází ke křížení tramvajových kolejí s jízdními pruhy ostatních účastníků silničního provozu. Každé toto křížení zvyšuje riziko vzniku dopravní nehody tramvajů s osobními automobily (dále jen auty). Každá dopravní nehoda tramvaje s autem je velký zásah do plynulosti přepravy cestujících. Následkem nehod dochází k dočasnému lokálnímu ochromení tramvajového systému, jelikož vozidla musí zůstat na místě nehody, dokud nedojde k zaznamenání nehody pracovníky dopravních podniků a dání povolení k odklizení nehody pracovníky Drážní inspekce. Po celou dobu odklizení následků nehod je daný úsek tramvajové trati neprůjezdný, což vede ke zpoždění ostatních tramvajových spojů, nutnosti zavádět objízdné trasy a nelibosti cestujících. [1]

Dopravní nehody jsou nejčastěji způsobeny lidskou chybou. Bohužel je v silniční dopravě často za tyto chyby placeno cennou nejvyšší, a to zdravím nebo životem. Návrh nově konstruovaných vozidel musí být tedy prováděn s vědomím, že lidé dělají chyby a přes zavedení dokonalejších prvků aktivní bezpečnosti nelze s absolutní jistotou zabránit vzniku dopravních nehod. Nově konstruovaná vozidla proto musí být vybavována dokonalejšími prvky pasivní bezpečnosti, které povedou k mírnění následků vzniklých nehod. Tato představa vychází z hlavní myšlenky programu Vize 0, který byl představen v roce 1995 ve Švédsku. Základním cílem programu Vize 0 je vytvořit a přijmout taková opatření dopravního systému i na vozidlech, aby do roku 2050 nedocházelo k úmrtím a aby bylo minimalizováno riziko vzniku těžkých zranění následkem dopravních nehod. [1], [2]



Obr. 1: Deformační prvek. [10]

Pro zvýšení pasivní bezpečnosti nově konstruovaných kolejových vozidel byla v roce 2008 vydána norma EN 15227. Hlavním cílem normy EN 15227 je snížení následků nehod na cestující a posádky uvnitř kolejových vozidel. Pro plnění požadavků normy EN 15227 jsou tramvaje na čelech vybavovány deformačními prvky, viz obrázek Obr. 1. Deformační prvky jsou prvním prvkem tramvaje, který přichází při nehodě do kontaktu s kolizním vozidlem. Úpravou parametrů deformačních prvků je možné ovlivnit následky nehod na obou kolizních vozidlech. Analýze parametrů deformačních prvků s ohledem na následky nehod se věnuje tento článek. (Česká technická norma:

ČSN EN 15227, Železniční aplikace - Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel, 2021)

2. Statistika nehodovosti tramvají na území ČR

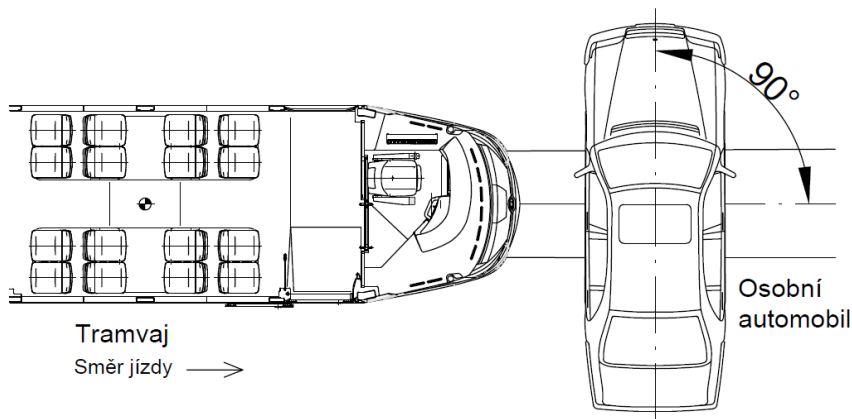
Pro stanovení závažnosti následků nehod tramvají s auty byla sestavena statistika nehodovosti tramvají na území České republiky za roky 2016 až 2018. Za zkoumané období bylo v 7 městech zaznamenáno 5 046 nehod tramvají s auty, to je více než 4 nehody denně. Typem nehod s nejzávažnějšími následky na zdraví řidičů aut



Obr. 2: Následky nehody tramvaje s autem. [1]

byl náraz čela tramvaje do boku auta. Při tomto typu nehod došlo ke zranění řidičů v autech v 17 % ze všech nehod. Vysoká četnost zranění řidičů aut při nehodách s auty potvrdila nutnost výzkumu snížení následků nehod tramvají s auty. [1]

Z vyhodnocení statistiky nehodovosti byl navržen výpočtový scénář reprezentující typ nehody s nejzávažnějšími následky. Tedy nehodu, kdy auto stojí kolmo přes tramvajový pás a tramvaj čelně narazí do boku auta v místě dveří řidiče. Schéma navrženého scénáře srážky je znázorněno na obrázku Obr. 3. [1]



Obr. 3: Schéma navrženého výpočtového scénáře. [1]

3. Tvorba simulačního modelu nehody tramvaje s autem

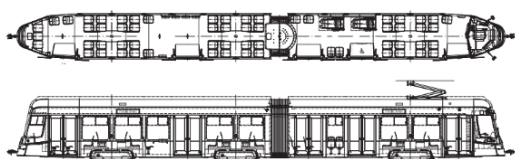
Simulační model byl vytvořen podle volně dostupných podkladů na internetu s ohledem na co největší přesnost reprezentace reálné nehody.

3.1. Simulační model tramvaje

Pro výzkum byla zvolena tramvaj ŠKODA 39T provozovaná v Ostravě. Důvodem bylo její konstruování podle požadavků normy EN 15227 a dostupnost velkého množství podkladů pro tvorbu simulačního modelu. Model byl vytvořen podle volně dostupných podkladů a zkušeností pracovníků ú12120 na fakultě strojní ČVUT v Praze.



Obr. 4: Tramvaj Škoda 39T. [12]



Obr. 5: Typový výkres tramvaje. [11]

Tramvaj ŠKODA 39T je dvoučlávková tramvaj se třemi podvozky. Rozměry tramvaje a pozice podvozků, elektrovýzbroje a sedaček pro cestující byly odměřeny z typového výkresu výrobce.

Hmotnost prázdné tramvaje 36 835 kg byla v modelu rozdělena do konstrukčních celků tramvaje: přední a zadní článek, elektrická výzbroj na střeše předního a zadního článku a podvozky tramvaje. Podle požadavků normy EN 15227 bylo uvažováno obsazení tramvaje polovinou sedících cestujících, tedy 30. Hmotnostní analýza tramvaje je uvedena v tabulce Tab. 1. [4]

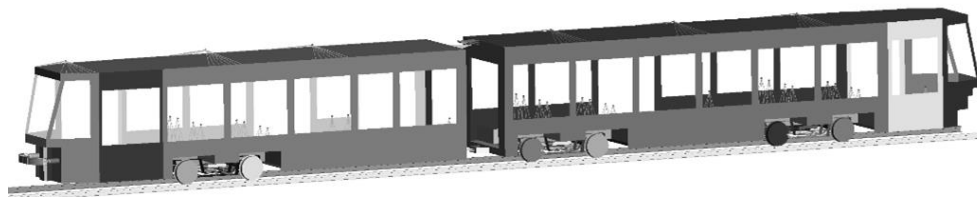
Simulační model tramvaje byl vytvořen v softwarech Ansys a LS-Prepost. Při tvorbě modelu byl zaveden předpoklad, že z důvodu vysoké pevnosti hrubých staveb článků tramvaj nedochází při nehodě s auty k jejich plastické deformaci. Argumentací byla velikost podélných sil, které musí být hrubé stavby článků schopny přenést po celou dobu životnosti, a maximální síly deformující deformační prvky tramvaj.

Tab. 1: Hmotnostní analýza tramvaje. [4]

Popis konstrukčního celku	Hmotnost [kg]
Přední článek	10 177
Zadní článek	12 373
Elektrická výzbroj (přední článek)	1 015
Elektrická výzbroj (zadní článek)	1 570
Podvozek 1 (netrakovní)	2 900
Podvozek 2 a 3 (trakční)	4 400
Hmotnost prázdné tramvaje	36 835
Cestující (přední článek)	770
Cestující (zadní článek)	1 330
Kolizní hmotnost tramvaje	38 935

Podle uvedeného předpokladu byly modely článků při výpočtu uvažovány jako dokonale tuhá tělesa. [4]

Jednotlivé části simulačního modelu byly mezi sebou propojeny silovými prvky reprezentující vazby, klouby a prvky vypružení. Typy silových prvků v simulačním modelu byly voleny tak, aby byla co nejdělněji reprezentována konstrukce reálné tramvaje. Finální podoba simulačního modelu tramvaje je znázorněna na obrázku Obr. 6. [4]



Obr. 6: Simulační model tramvaje. [4]

3.2. Simulační model auta

Parametry a přesnost simulačního modelu auta byly pro výzkum zásadní. Nekvalitní a nepřesný model auta by vedl ke špatným výsledkům a nepřesným závěrům výzkumu. Tvorba přesného a validovaného simulačního modelu nebylo v rámci výzkumného projektu možná, a proto bylo nutné převzít zkušenosti a podklady z jiných projektů.



Obr. 7: Auto Toyota Yaris 2010. [13]

Pracovníci National crash analysis center (NCAC) při americké univerzitě George Masone poskytují na svých webových stránkách (ccsa.gmu.edu) volně dostupné simulační modely různých silničních motorových vozidel. Z dostupných modelů aut byl vybrán model auta Toyota Yaris 2010. Tento model svými parametry nejlépe odpovídá modelu auta ŠKODA Fabia, který byl v roce 2021 nejprodávanejším

modelem auta na území ČR. Simulační model auta byl validován pro čelní i boční nárazy podle vícero zkoušek provedených na reálném vozidle. Pro řešení výzkumu tak mohl být zaveden předpoklad, že výsledky simulačních výpočtů provedených na tomto modelu budou s vysokou přesností odpovídat průběhům zkoušek provedených na reálném vozidle. [5]

3.3. Simulační model řidiče

Simulační modely lidí vznikají jako kopie ke každé mechanické figuríně používané při nárazových zkouškách aut. Důvodem je, co nejlepší predikce

následků různých dopravních nehod na cestující uvnitř vozidel již při fázi návrhu vozidla. Tento postup umožňuje optimalizovat konstrukci nových aut ještě ve fázi návrhu, tedy než bude zahájena jejich sériová výroba. [6]



Obr. 8: Simulační model WorldSID 50th Male. [7]

WorldSID 50th Male (see picture 23), která reprezentuje průměrného dospělého muže o hmotnosti 74 kg. [7]

Model figuríny WorldSID 50th Male byl vytvořen na principu tuhých těles. Simulační modely vytvořené z tuhých těles jsou vytvořeny z více tuhých těles, které jsou mezi sebou propojeny vazbami, reprezentující klouby člověka. Výpočty s těmito modely jsou schopné dobře predikovat pohyb člověka po nehodě a průběhy zrychlení a sil působících na jednotlivé části lidského těla. [6]

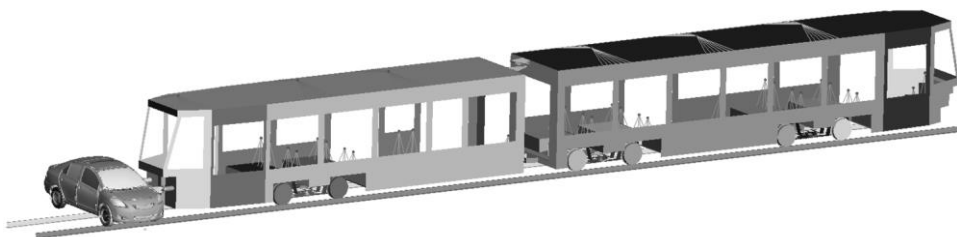
3.4. Biomechanické kritérium člověka 3 ms

Biomechanická kritéria člověka byla zavedena pro hodnocení následků nehod na cestující uvnitř aut. Biomechanická kritéria člověka definují vztahy mezi fyzikálními veličinami a pravděpodobností vzniku zranění pasažérů. Při schvalování nových vozidel musí být naměřené hodnoty biomechanických kritérií menší než stanovené limitní hodnoty. [6]

Z používaných kritérií organizací Euro NCAP pro hodnocení bezpečnosti při bočních nárazech byla pro hodnocení následků nehod zvoleno biomechanické kritérium hlavy 3 ms. Toto kritérium vyhodnocuje velikost zrychlení hlavy řidiče v závislosti na čase. Podle požadavků organizace Euro NCAP nesmí být zrychlení hlavy řidiče po dobu 3 ms větší než 72g. [8]

3.5. Simulační model nehody tramvaje s autem

Simulační model nehody tramvaje s autem vytvořený z dříve popsanych submodelů je znázorněn na obrázku Obr. 9.



Obr. 9: Simulační model nehody tramvaje s autem.

4. Analýza vlivu parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod na auta

Snížení následků nehod tramvají s auty může být dosaženo aplikací poznatků z oblasti geometrie silničních vozidel při nehodě na parametry deformačních prvků tramvají, jelikož jsou prvním prvkem tramvaje, který při nehodě přichází do kontaktu s kolizním vozidlem.

Poznátky z oblasti kompatibility geometrie vozidel byly aplikovány na pozici deformačních prvků nad rovinou temene koleje. Při výzkumu byla uvažována výšková pozice deformačních prvků v rozpětí 400 mm do 900 mm. U původní konstrukce tramvaje byly deformační prvky umístěny ve výšce 775 mm nad rovinou temene koleje. Veškeré provedené výpočty byly provedeny na simulačním modelu popsaném v kapitole 3 při úvaze počáteční rychlosti

Tab. 2: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms.

Výšková pozice nad rovinou TK [mm]	Biomechanické kritérium člověka 3 ms		
	Hodnota kritéria [-]	Hodnota kritéria [%]	Doba překročení limitní hodnoty [ms]
400	44.9	41.4	0.0
450	48.3	44.5	0.0
500	57.8	53.2	0.0
550	73.8	67.9	0.7
600	78.8	72.6	1.2
650	89.4	82.3	3.9
700	100.9	93.0	4.5
750	104.4	96.1	5.5
775	108.6	100.0	6.1
800	114.4	105.3	6.3
850	116.4	107.1	6.9
900	120.1	110.6	7.3

tramvaje 25 km/h. Výsledky biomechanického kritéria 3 ms pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

5. Závěr

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 2 jednoznačně vyplynulo, že výšková pozice os deformačních prvků tramvají má zásadní vliv na následky nehod tramvají s auty. Čím níže byly deformační prvky tramvají umístěny, tím nižší hrozilo riziko vzniku zranění hlavy cestujícím v autech. Od umístění os nárazníků do výšky 600 mm nad rovinu TK již nedošlo k překročení limitních hodnot biomechanického kritéria člověka 3 ms. Při umístění os deformačních prvků do výšky 400 mm nad rovinu TK došlo ke snížení hodnoty kritéria 3 ms o 59 % vůči nominální pozici. Primárním důvodem pozitivních výsledků byla menší deformace boku auta, která byla dána kontaktem nárazníku tramvaje s tuhými podélnými prahy auta, které jsou dimenzovány na náraz jiného vozidla podle požadavků předpisu EHK/OSN č. 95 [9].

V rámci dalšího výzkumu bude zkoumán vliv tuhosti a rozměrů deformačních prvků na následky nehod. Následně bude zkoumán vliv navržených úprav na následky nehod tramvají s jinými účastníky silničního provozu.

Literatura

- [1] Jakub Seidl. *The influence of the construction of tram fronts on the consequences of accidents with passenger cars*. Sborník konference Moderní železnice, Fakulta dopravní ČVUT, Praha, Česká republika, 2022.
- [2] Hans von Holst; Ake Nygren; Roland Thord. *Transportation, Traffic Safety and Health*. ISBN 978-3-662-03409-5, SpringerVerlag GmbH, Berlín, Německo, 1997.
- [3] Český normalizační institut. *ČSN EN 15227, Železniční aplikace – Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 2021.
- [4] Jakub Seidl. *Vliv konstrukce čela tramvaje na následky nehod s osobními automobily*. Sborník studentské konference ŽELVA 2022, ISBN 978-80-01-07046-8, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2022.
- [5] Autosalon.tv. *Pohled do statistik nejprodávanějších aut ukazuje, že český trh je v Evropě ten nejpodivnější*. Dostupné online: autosalon.tv (přístup 25. května 2020).
- [6] Lukáš Čapek; Petr Hájek; Petr Henyš a kolektiv. *Biomechanika člověka*. ISBN 978-80-271-0367-6, Grada Publishing a.s., Praha, Česká republika, 2018.
- [7] Fadi J. Tahan; Umashankar Mahadeviaiah; Dhafer Marzouhui; Cing-Dao Kan. *LSTC WorldSID 50th Male Finite Element Model*. Výzkumná práce, LSTC, Livermore, Spojené státy americké, 2018.
- [8] Euro NCAP. *Assessment protocol - AOP v9.1.3*. Dostupné online: cdn.euroncap.com (přístup 15. srpna 2022).
- [9] Evropská komise. *EHK/OSN č.95: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při bočním nárazu*. Předpis, 2014.
- [10] Vladan.foto. Dostupné online: vladan.foto.cz (přístup 10. září 2020).
- [11] mhd-ostrava. *Škoda 39T ForCity Smart*. Dostupné online: mhd-ostrava.cz (přístup 19. března 2022).
- [12] Sokolovsky.denik.cz. *Škoda 39T ForCity Smart*. Dostupné online: sokolovsky.denik.cz (přístup 21. června 2021).
- [13] Dhafer Marzougui; Randa Radwab Samaha; Chongzhen Cui; Cing-Dao Kan. *Extended validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan*. NCAC 2012-W-005, Výzkumná zpráva, Univerzita George Washingtona, Washington DC, Spojené státy americké, 2012.

Poděkování

Výzkum byl realizován s podporou studentské grantové soutěže projektu SGS23/161/OHK2/3T/12.

Akustická situace v okolí diskontinuit vegetačního krytu tramvajové trati

Jakub Šurovský¹, Denisa Pasáková², Ing. Lenka Lomoz, Ph.D.³

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7/2077, 166 29, Praha 6 - Dejvice

email_1: surovjak@student.cvut.cz,

email_2: pasakden@student.cvut.cz,

email_3: lenka.lomoz@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Práce hodnotí vliv lokální změny povrchu na emitovaný hluk z tramvajové dopravy na tratích s vegetačním, resp. asfaltovým krytem. V první části je popsáno teoretické zázemí problematiky hluku emitovaného tramvajovou dopravou, druhá část souhrnně předkládá průběh a výsledky akustických měření v okolí zvolené referenční trati. V závěru práce je shrnuta úroveň nárůstu emitovaného hluku vlivem změny krytu z vegetačního na asfaltový v širších souvislostech.

Klíčová slova

tramvajová trať, tramvaj, hluk, hluk z tramvajové dopravy, vegetační kryt, asfaltový povrch

Acoustic Situation in the Surroundings of the Green Tramway Track Discontinuity

Abstract

This paper deals with the problem of local surface changes on emitted noise from tramway traffic on lines with green, or embedded track. In the first part there is theoretical background of noise emissions by tramway traffic described. The second part summarizes the progress and results of acoustic measurements related to the chosen reference line. In the end, there is the level of the increase in emitted noise due to the change of the type (cover) of tramway track summarized in a broader context.

Keywords

tramway track, tramway, noise, noise from tramway traffic, green track, asphalt cover

1. Úvod

Vyhodnocování negativních vlivů dopravy, a to včetně jejich vyčíslení a ekonomického posouzení v podobě externích nákladů, nabývá v posledních letech na významu. Narůstá objem poznatků týkajících se negativních účinků vnějších faktorů na zdraví, kam se mimo působení škodlivých chemických sloučenin a polétavého prachu řadí i vystavení nadměrnému množství světla a hluku. [1]

Výstavbu nových TT nezřídka limituje odpor veřejnosti z důvodu estetiky nebo množství hluku, resp. nesplnění hygienických limitů pro hluk z tramvajové dopravy dle hlukové studie. Hlubší porozumění problematice emisí hluku v závislosti na konstrukci TT může pomoci při výběru vhodného krytu TT a nalezení optimálního řešení pro danou lokalitu.

Příspěvek vychází z předchozí práce autorů [2], jejímž cílem bylo posouzení vlivu diskontinuit vegetačního krytu tramvajové trati (TT) na úroveň vyzářovaného hluku.

2. Zvuk a hluk

2.1. Definice a základní veličiny

Pojem hluk označuje rušivý zvuk s nepříznivými účinky na zdraví člověka. Zatímco hluk nelze přesně fyzikálně popsat, zvuk je obecně definován jako slyšitelné mechanické vlnění o kmitočtu 20 až 20 000 Hz. [3]

Informaci o změně tlaku v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu vlivem vlnění podává hladina akustického tlaku L_p [dB] a v kombinaci s váhovým filtrem A tvoří hladinu akustického tlaku A, L_{pA} [dB], která reprezentuje působení akustického signálu na člověka a dává dobrý soulad se subjektivním vnímáním zvuku. [3]

Z hlediska časové změny L_{pA} lze rozdělit hluk na ustálený (mění se v čase o méně než 5 dB) a proměnný (mění se o více než 5 dB). Ekvivalentní hladina akustického tlaku s váhovým filtrem A, $L_{Aeq,T}$ [dB], je fiktivní ustálená hladina, která se používá pro hodnocení proměnného hluku, jelikož pro daný čas T stanovuje stejný účinek na člověka jako proměnná hodnota L_{pA} . [3]

Hladina expozice zvuku L_{AE} [dB] vystihuje celkovou energii emitovanou zdrojem (např. průjezdem tramvaje) za dobu pozorování vztaženou k času $T = 1$ s.

2.2. Hluk v souvislostech

Jako protihlukové opatření se v dopravním stavitelství konvenčně využívá protihlukových clon, nicméně obecně platí, že v prostředí smíšené městské a tramvajové komunikace je jejich použití nevhodné, a to zejména z hlediska bariérového efektu nebo estetiky. Existuje však široká škála jiných řešení aplikovaných přímo v konstrukci koleje. Jsou jimi například otevřené kolejové lože, vegetační kryt [4], odpovídající prostorové uspořádání nebo nízká protihluková clona.

2.3. Vegetační kryt tramvajové trati

Vegetační kryt TT je nejčastěji budován v kombinaci s konstrukcí z betonových příčných pražců a kolejového lože, zřídka také na pevné jízdni dráze [4]. Součástmi vegetačního krytu jsou (shora dolů) samotné rostliny, substrát, geotextilie s filtrační a separační funkcí, plastové krytky upevňovadel a pryžové bokovnice kolejnic.

Mezi výhody vegetačního krytu tramvajové trati se řadí nižší emise hluku ve srovnání jak s krytem zpevněným (asfaltovým, betonovým), tak s konstrukcí bez krytu [4], tj. s otevřeným kolejovým ložem, dále potenciál zachytávání uhlíku (v závislosti na rostlinách), zvyšování biodiverzity (třebaže se jedná o antropogenní habitat), v neposlední řadě schopnost zadržovat vodu a zvýšit estetickou hodnotu prostoru [5]. Na druhou stranu je vegetační kryt nejčastěji uspořádán jako nepojízditelný, vyvozuje dodatečné pořizovací náklady ve srovnání s variantou bez krytu [5] a zvýšené náklady nejen na jeho údržbu, ale i konstrukce trati pod ním.

3. Praktické měření

Vstupními údaji jsou naměřené údaje pro práci SVOČ² [2], kdy byly koncem března 2023 provedeny dvě měřicí kampaně, jejichž obsahem bylo provést technické a hygienické měření akustických hladin. Pro účely této práce byly využity pouze hodnoty z měření technického, a to pro své obecné použití.

3.1. Popis lokality

Pro experimentální měření byla zvolena referenční trať v úseku Vítězné náměstí – Nádraží Podbaba vedoucí ulicí Jugoslávských partyzánů na pomezí katastrálních území Dejvice a Bubeneč v Praze.

TT prošla v roce 2011 rekonstrukcí, jejíž součástí bylo cca 400 m dlouhé prodloužení z původní smyčky Podbaba do dnešní zastávky Nádraží Podbaba. Vyjma krátkého úseku na začátku (přejezd na Vítězném náměstí) a na konci (zastávka Nádraží Podbaba a smyčka) je konstrukce celé trati tvořena příčnými betonovými pražci B03 uloženými na kolejovém loži tvořeném hrubým drceným kamenivem frakce 32/63 (dle označení v době výstavby [5] [6]) a kolejnicemi S49 (v současnosti (2023) označované jako 49E1), a to i v místě přejezdu, kde je kolejnice doplněna o žlábek tvořící profil.

V měřených bodech se nacházejí tři typy konstrukce krytu TT. Kolejnice je vždy opatřena speciální bokovnicí. Daný kryt dle projektové dokumentace [6] [7] tvoří:

- 1) vegetační kryt – konstrukce dle kapitoly 2.3,
- 2) přechod – MA 11 III (40 mm), MA 16 I (40 mm), ACP (75, resp. 95 mm),

² Studentská Vědecká Odborná Činnost (SVOČ) je soutěž samostatných vědeckých a odborných prací studentů bakalářských, magisterských a doktorských studijních programů.

3) přejezd – MA 11 I (40 mm), MA 16 I (40 mm), beton C20/25 (75, resp. 95 mm) (část přejezdu sloužící jako přechod je konstruována jako „přechod“ dle 2)). [6] [7]

Zkratka MA označuje litý asfalt, ACP asfaltový beton pro podkladní vrstvy.

V blízkosti sledovaného úseku se nachází celkem tři zastávky, nácestné Lotyšská a Zelená a konečná Nádraží Podbaba. V průběhu měření (březen 2023) trať obsluhovaly linky 8 a 18. V místě nebyly zjištěny žádné výrazné a přímo pozorovatelné vady na dopravní cestě (tj. vlnovitost kolejnic, nevyhovující geometrická poloha koleje ani jiná významná degradace materiálu).

4. Akustické měření

4.1. Technické měření

Technické měření hluku specifikuje technická norma ČSN EN ISO 3095, Železniční aplikace – Akustika – Měření hluku vyzařovaného železničními vozidly [8]. Základním požadavkem je umístění mikrofonu 7,5 m kolmo od osy koleje ve výšce 1,2 m nad temenem kolejnice. Prostřednictvím technického měření je možné zachytit, posoudit a porovnat úroveň hluku vyzařovanou konkrétním vozidlem v závislosti na daném povrchu TT.

4.2. Použité přístroje, zkušební metody

Veškerá měřicí technika měla v době měření platné kalibrační, resp. ověřovací listy. Během měření byly použity zvukoměry přesnosti třídy 1, jmenovitě zvukoměr Brüel & Kjær typ 2250-L (v.č. 2654639) s mikrofonem Brüel & Kjær typ 4950 (v.č. 2879842) a zvukoměr Brüel & Kjær typ 2270 (v.č. 3000925) s mikrofonem Brüel & Kjær typ 4189 (v.č. 2785058).

Dále byla použita další pomocná měřidla, jako akustický kalibrátor Brüel & Kjær typ 4230 (v.č. 1026612), pásmo 30 m, teploměr a vlhkoměr Comet S3121, anemometr 5000, laserový dálkoměr HILTI PD 32, barometr Greisinger GTD 1100, kovový stativ 2 ks a radar na měření rychlosti (Buschnell).

Během akustických (technických) měření se vyházelo z technických norem ČSN ISO 1996-1 Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí, Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení [9], ČSN ISO 1996-2 Akustika – Popis a měření hluku prostředí – Část 2: Určování hladin hluku prostředí [10] a ČSN EN ISO 3095, Železniční aplikace – Akustika – Měření hluku vyzařovaného železničními vozidly. [8]

4.3. Měřicí postup

Technické měření bylo provedeno ve stanovišti dle příslušné normy [7]. Byl zaznamenáván kontinuálně časový rozvoj ekvivalentních hladin akustického tlaku (váhový filtr A) $L_{Aeq,T}$ a to s časovou konstantou F – fast

a krokem záznamu 1 s. Měření probíhala 29. 3. a 31. 3. 2023 vždy v denní době.

Meteorologické podmínky (teplota, vlhkost, rychlost větru, atmosférický tlak) uvádí tabulka 1, čas měření tabulka 2. Po celou dobu měření v oba dny byly meteorologické podmínky vyhovující. Ověření mikrofону kalibrátorem neprokázalo rozdíl mezi odečty před a po měření větší než 0,2 dB. Osa hlavní citlivosti mikrofону vždy směřovala kolmo k ose tramvajové trati, vždy byl použit ochranný kryt proti větru.

Tab. 1 – Meteorologické podmínky pro všechna stanoviště

SELČ	t [°C]	Vlhkost [%RH]	V_{vitr} [m/s]	Atm. tlak [hPa]	SELČ	t [°C]	Vlhkost [%RH]	V_{vitr} [m/s]	Atm. tlak [hPa]
29.3.23 9:00	5,7	48,1	1	997,2	31.3.23 8:15	15,7	59,0	1	981,2
29.3.23 9:30	5,8	48,0			31.3.23 8:30	15,8	56,6		
29.3.23 10:00	5,7	47,4			31.3.23 9:00	11,6	68,9		
29.3.23 10:30	5,5	52,3			31.3.23 9:30	12,1	67,9		
29.3.23 11:00	5,3	63,0			31.3.23 9:45	13,4	65,2		

Ze zvukového záznamu byly vyloučeny hlukové události, které nejsou předmětem hodnocení, dále byly vyřazeny všechny průjezdy tramvaj se slyšitelnými defekty na jízdni ploše kol (tzv. „obutí“ nebo „plochy“) [11], anebo měření negativně ovlivněná průjezdem vozidla se zapnutou sirénou, použitým výstražným zvoncelem nebo průjezdem jiného hlasitého vozidla (autobus nebo automobil).

4.4. Měřicí stanoviště

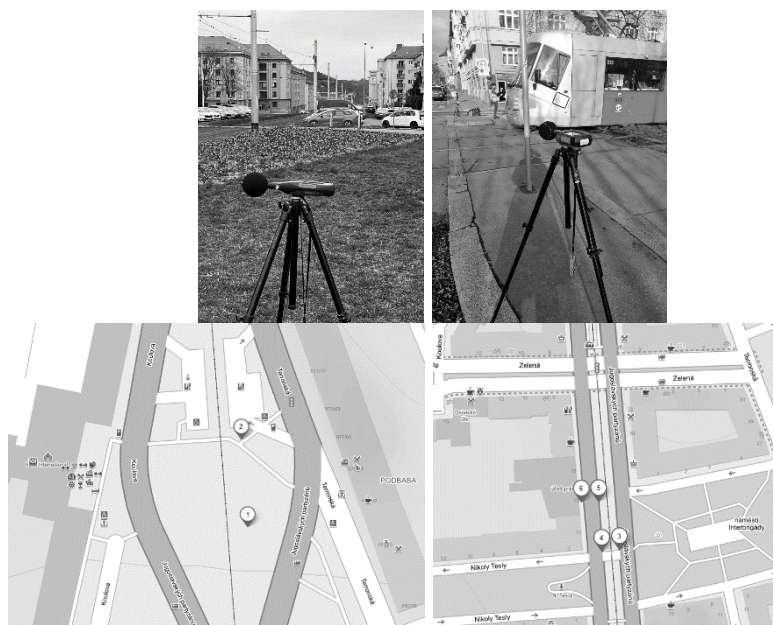
Technické měření bylo provedeno na 5 stanovištích (4 profilech) rozmístěných podél tramvajové trati Vítězné náměstí – Nádraží Podbaba v ulici Jugoslávských partyzánů. Stanoviště č. 1 až 5 byla umístěna ve vzdálenosti 7,5 m kolmo na osu koleje ve výšce 1,2 m nad temenem kolejnice. [8] Stanoviště č. 3 až 5 byla umístěna z prostorových důvodů tak, že mezi předmětnou osou koleje a mikrofonom se nacházela protisměrně pojížděná kolej. Použita jsou dále data získaná na 4 stanovištích pro technické měření.

Stanoviště nebyla nijak trvale stabilizována. Místa jsou znázorněna na mapě a fotodokumentaci na obrázku 1.

Poloha všech stanovišť byla zvolena tak, aby tramvaj projížděla místem výběhem, čímž byla sledována snaha maximálně vystihnout množství akustické energie emitované vlivem konstrukce, resp. krytu TT. Tramvajová trať je ve všech měřených bodech v přímé, na stanovištích č. 1 a 2 klesá ve směru z centra 21,6 ‰, v místě stanovišť č. 3 až 6 22,5 ‰. [6] [7]

Tab. 2 – Doba a místo měření, použitý přístroj a počet průjezdů

Datum	Měřicí stanoviště a popis	Zvukoměr	Čas příchodu	Čas odchodu	Počet průjezdů
29.03.2023	1 - ZC (P), veg. kryt	BK 2250-L	9:30	11:05	15
29.03.2023	2 - ZC (P), přechod	BK 2270	9:30	11:05	
31.03.2023	3 - DC, přejezd	BK 2270	8:10	8:45	16
31.03.2023	4 - ZC (P), přejezd	BK 2250-L	8:10	8:45	
31.03.2023	5 - ZC (P), veg. kryt	BK 2270	8:50	9:45	12
31.03.2023	6 - hygienické	BK 2250-L	8:50	9:45	25



Obr. 1 – Měřicí stanoviště 1, 2 (zcela vlevo) a 3, 4 (druhé zleva) – situace a umístění

4.5. Zdroj a šíření hluku

Zdrojem hluku ve sledované lokalitě je tramvajová doprava, charakter hluku je proměnný ($\Delta L > 5$ dB). Jeho dominantní složkou je hluk valivý, který vzniká interakcí pohybujícího se kola a kolejnice. Významnou složkou je dále hluk trakce, dalšími hluk aerodynamický a od pantografu. Volbou měřicích stanovišť v místě mimo zastávky byla omezena složka hluku pocházející od trakce pro zvýšení podílu valivého zvuku z důvodu jeho následného porovnání s přihlédnutím k typu krytu v daném místě.

Rychlost projíždějících vozidel byla měřena přímo, a to radarem Buschnell, pohybovala se od 27 do 50 km/h. Hluk ze zdroje se šířil vzduchem.

4.5.1 Typy tramvají

V průběhu měření se na trati vyskytovala vozidla 14T, 15T a T3R.P (souprava dvou vozů; viz obrázek 2), v průběhu jednoho měření také cvičný vůz T3R.P (ev. č. 5526). Délka tramvaje 14T činí 30 250 mm, 15T 31 400 mm a T3R.P (jeden vůz) 14 000 mm. [12]



Obr. 2: Setkání tramvají typu (zleva) 14T, T3SU a 15T

4.6. Hluk pozadí a zbytkový hluk, vyhodnocení

Hluk pozadí zahrnuje všechny zvuk způsobené zdroji, které nejsou předmětem daného měření, v tomto případě například dominantní silniční doprava v ulici Jugoslávských partyzánů. Pojem zbytkový hluk označuje celkový zbývající zvuk v daném místě po potlačení vybraných zdrojů hluku pozadí a měřeného zdroje (projíždějící automobily a tramvaje po ulici Jugoslávských partyzánů), v místě měření činil řádově 60 dB. [2]

Data byla zpracována prostřednictvím software Brüel & Kjær Evaluator 7820 s následným tříděním prostřednictvím MS Office Excel. Byla vyloučena měření rušena vlivy uvedenými v kapitole 4.3.

4.7. Stanovení délky průjezdu

Délka průjezdu byla stanovena (nejprve pro stanoviště č. 1) jako doba, kdy ekvivalentní hladina akustického tlaku časového záznamu poklesla nejméně o 10 dB od chvíle, kdy první, resp. poslední náprava tramvaje míjí měřící místo. Tento postup vyhodnocení odpovídá normě ČSN EN ISO 3095. [8] Díky znalosti rychlosti bylo možné vytvořit převodní tabulku (3, přesnost ± 1 s) a aplikovat stejnou dobu jako délku průjezdu i v dalších měřících bodech pro

co nejpřesnější srovnání vlivu konstrukce na akustickou situaci definovanou veličinami $L_{Aeq,T}$ a L_{AE} . Rozhodujícím parametrem pro volbu délky průjezdu v dalších stanovištích byla rychlost tramvaje.

Tab. 3 – Převodní tabulka pro určení délky průjezdu v závislosti na rychlosti tramvaje

V [km/h]	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50
t [s]	9	8	7	6	5

4.8. Naměřená data

Během technického měření hluku bylo na stanovištích 1 až 4 naměřeno 46 průjezdů tramvají (z toho 6 průjezdů vyřazeno) s rozložením mezi typy: 31× 15T, 9× 14T a 6× T3. Podrobnější data uvádějí tabulky 4 a 5.

Zaznamenány byly informace o typu tramvaje a evidenčním číslu (v případě soupravy pouze jednoho z vozů), rychlosti a času průjezdu. Dále byly v terénu zaznamenány doplňující informace pro snadnější orientaci, jako jsou čísla linky, směr jízdy (do centra = DC, z centra = P, resp. ZC) a doplňující informace k průjezdu. Pro přehlednost jsou v následujících tabulkách (4 a 5) uvedeny pouze záznamy ovlivňující akustické hodnocení. Doba průjezdu (DP) je stanovena dle kapitoly 4.7. Vyřazená měření jsou světle podbarvena. Datum měření je uvedeno v popisku.

Naměřené hodnoty $L_{Aeq,T}$ na stanovišti č. 5 byly negativně ovlivněny blízkým silničním přejezdem, a tedy je nebylo možné vyhodnotit a dále využít. Naměřená data ze stanoviště č. 5 tak nejsou dále uvedena.

Charakteristickou hladinou expozice zvuku L_{AE} a ekvivalentní hladinu akustického tlaku $L_{Aeq,T}$, které obsahují tabulky 4 a 5, lze získat prostřednictvím rovnice 1 a 2 [2], kde T značí sledovaný časový úsek t_2-t_1 [s], p akustický tlak [Pa] a p_0 ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa) referenční akustický tlak [Pa]. Je možné vypočítat i hodnotu normovanou pro konkrétní rychlost tramvaje V , což popisuje rovnice 4, kde je použita konstanta $k_1 = 17$ (empiricky pro tramvaj). Rychlost V_r , ke které jsou normovány hladiny L_{AE} jednotlivých průjezdů, je stanovena 40 km/h (průměr ze skutečně naměřených hodnot rychlosti). Pro další zpracování je použita hladina expozice zvuku L_{AE} normovaná na rychlost $V_r = 40$ km/h.

Rovnice 1 – Ekvivalentní hladina akustického tlaku

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{p^2}{p_0^2} dt\right) \quad [\text{dB}]$$

Rovnice 2 – Hladina expozice zvuku

$$L_{AE} = L_{Aeq} + 10 \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right), t_0 = 1 \text{ s} \quad [\text{dB}]$$

Rovnice 3 – Hladina $L_{AE,n}$ normovaná na rychlost

$$L_{AE,n} = L_{AE} - k_1 \cdot \log\left(\frac{V}{V_r}\right) \quad [\text{dB}]$$

Rovnice 4 – Střední energetická hladina

$$L_{en} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (10^{0,1 \cdot L_i})\right) \quad [\text{dB}]$$

Tab. 4 – Naměřené a normované hodnoty ze dne 29. 3. 2023 – stanoviště č. 1 (vegetační kryt) a č. 2 (přechod)

ID	Čas [hh:mm]	Typ	Ev. č.	V [km/h]	DP [s]	Veg. kryt (stan. č. 1)			Přechod (stan. č. 2)		
						$L_{Aeq,T}$ [dB]	L_{AE} [dB]	$L_{AE,n}$ [dB]	$L_{Aeq,T}$ [dB]	L_{AE} [dB]	$L_{AE,n}$ [dB]
1	9:44	15T	9240	37	7	63,7	72,2	72,8	67,7	76,1	76,7
2	9:51	14T	9138	45	5	67,2	74,1	73,2	72,9	79,9	79,0
3	9:55	15T	9214	40	7	66,9	75,3	75,3	69,2	77,7	77,7
4	10:00	T3R.P 2x	8379	27	8	64,1	73,2	76,1	69,8	78,8	81,7
5	10:07	15T	9305	35	7	63,0	71,5	72,5	65,7	74,2	75,2
6	10:11	15T	9446	28	9	„PLOCHY“, IZS			„PLOCHY“, IZS		
7	10:16	15T	9298	48	6	67,3	75,1	73,8	69,0	76,8	75,5
8	10:19	14T	9151	36	7	65,0	73,5	74,3	70,6	79,1	79,9
9	10:26	15T	9304	38	6	63,2	71,0	71,4	67,2	75,0	75,4
10	10:28	15T	9326	46	7	63,9	72,3	71,3	66,7	75,1	74,1
11	10:36	15T	9322	36	7	63,2	71,6	72,4	66,4	74,9	75,7
12	10:40	15T	9439	35	7	„PLOCHY“			„PLOCHY“		
13	10:44	15T	9312	47	6	65,1	72,9	71,7	68,6	76,4	75,2
14	10:46	15T	9303	40	7	64,1	72,6	72,6	67,8	76,3	76,3
15	10:59	14T	9131	48	5	69,0	76,0	74,7	73,7	80,6	79,3

Tab. 5 – Naměřené a normované hodnoty (31. 3. 2023) – stanoviště č. 3 (tramvaje ve směru DC, stanoviště u koleje ZC/P) a 4 (vice versa)

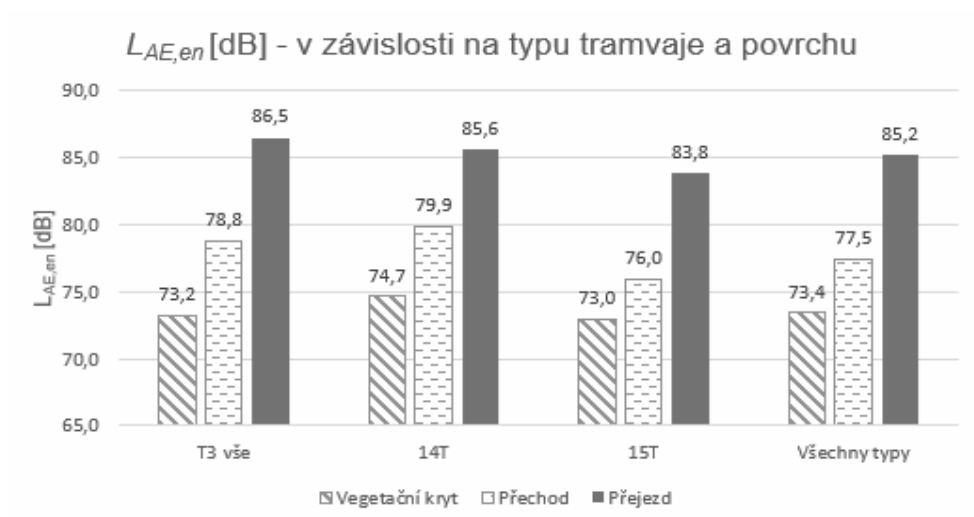
ID	Čas [hh:mm]	Směr	Typ	Ev. č.	V [km/h]	DP [s]	$L_{Aeq,T}$ [dB]	L_{AE} [dB]	$L_{AE,n}$ [dB]
1	8:15	DC	15T	9247	42	7	71,2	79,7	79,3
2	8:16	P	15T	9308	45	6	„PLOCHY“		
3	8:17	P	T3 cv	5526	35	5	HLUK POZADÍ		
4	8:20	DC	15T	9450	46	6	„PLOCHY“		
5	8:22	P	T3R.P 2x	8424	47	6	81,4	89,2	88,0
6	8:22	P	14T	9132	45	6	79,3	87,0	86,1
7	8:24	DC	15T	9308	35	8	72,0	81,0	82,0
8	8:28	DC	14T	9138	50	5	77,4	84,4	82,8
9	8:29	P	15T	9318	48	6	77,4	85,2	83,9
10	8:30	P	15T	9326	48	5	HLUK POZADÍ		
11	8:32	DC	T3R.P 2x	8425	50	5	78,9	85,9	84,3
12	8:35	P	15T	9295	50	6	77,9	84,9	83,3
13	8:35	DC	14T	9132	46	5	78,1	85,1	84,1
14	8:36	DC	T3 cv	5526	35	8	71,7	80,7	81,7
15	8:39	P	15T	9448	45	6	76,6	84,4	83,5
16	8:39	DC	15T	9318	47	5	79,0	86,0	84,8

5. Vyhodnocení

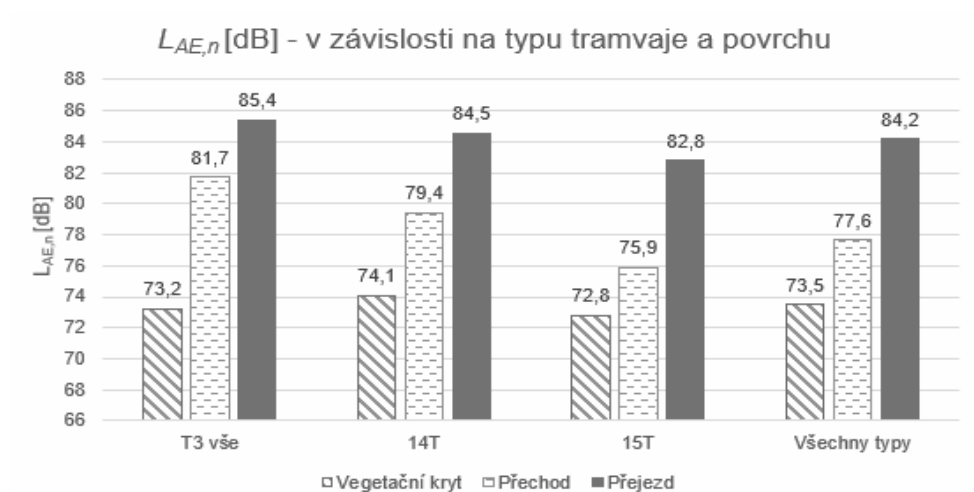
Prostřednictvím střední energetické hladiny L_{en} jsou vyjádřeny výsledné hodnoty hladiny pro jednotlivé typy (kategorie) tramvajů a měřicí stanoviště, respektive daný kryt (vegetační, přechod a přejezd s povrchem z litého asfaltu). Získá se z rovnice 4, kde n značí počet měření a L_i jednotlivé hladiny. Jako vstupní hodnoty pro hladinu L_{AE} jsou uvažovány hodnoty L_{AE} normované na rychlost $V_r = 40$ km/h, konstanta $k_1 = 17$ (empiricky), viz rovnice 4.

Nepřesnosti měření tvoří stanovení délky průjezdu a určení času průjezdu, významný vliv má také hluk pozadí, jehož hladina je vysoká vzhledem k dané denní době (pracovní den dopoledne) a umístění (intravilán rušného města).

Výsledné zpracované hodnoty uvádí grafy 1 a 2.



Graf 1 – Porovnání střední hladiny expozice zvuku $L_{AE,en}$ [dB] v závislosti na krytu a typu tramvaje (nezávisle na V_r)



Graf 2 – Hladina expozice zvuku $L_{AE,n(en)}$ [dB] normovaná na rychlost $V_r = 40$ km/h v závislosti na krytu a typu tramvaje

Tabulka 7 – Porovnání střední hladiny expozice zvuku $L_{AE,en}$ [dB] a $L_{AE,n(en)}$ [dB] v závislosti na krytu a typu tramvaje

Stanoviště Typ ↓	1 - veg. kryt		2 - přechod		3 a 4 - přejezd	
	$L_{AE,en}$ [dB]	$L_{AE,n(en)}$ [dB]	$L_{AE,en}$ [dB]	$L_{AE,n(en)}$ [dB]	$L_{AE,en}$ [dB]	$L_{AE,n(en)}$ [dB]
T3 vše	73,2	73,2	78,8	81,7	86,5	85,4
14T	74,7	74,1	79,9	79,4	85,6	84,5
15T	73,0	72,8	76,0	75,9	83,8	82,8
Průměr (L_{en})	73,4	73,5	77,5	77,6	85,2	84,2

6. Závěr

Vyhodnocená data z akustických měření ukazují, že hladina L_{AE} , resp. L_{Aeq} se liší v závislosti na použitém krytu TT. Nejnižších hodnot lze dosáhnout použitím vegetačního krytu, pro referenční trať vychází $L_{AE,n(en)} = 73,5$ dB (pro srovnání $L_{AE,en} = 73,4$ dB). V případě přechodu je hladina $L_{AE,n(en)} = 77,6$ dB, pro přejezd $L_{AE,n(en)} = 84,2$ dB. Je patrné, že hladina expozice zvuku $L_{AE,n(en)}$ normovaná na rychlost $V_r = 40$ km/h se významně neliší od hladiny $L_{AE,en}$ (viz tabulka 7). Nejnižší průměrné hladiny expozice zvuku, a to $L_{AE,en}$ i normované $L_{AE,n(en)}$, dosahuje pro všechna hodnocená stanoviště tramvaj typu 15T.

Rozdíl mezi povrchy může být způsoben jednak zvukovou pohltivostí/odrazivostí, délkou úseku (šířka přechodu činí 4,00 m, šířka přejezdu 11,75 m, z toho 4,75 m tvoří lehčí konstrukce přechodu) a konstrukcí krytu (rozdíl v použití betonu C20/25 v přejezdu pro silniční dopravu, resp. asfaltového betonu pro podkladní vrstvy – ACP v konstrukci přechodu). [6] [7]

Z výsledků technického měření plyne, že i pro hygienické měření jakožto zákonný požadavek kladený na provozovatele dráhy a posuzovaný pro chráněný venkovní prostor libovolné dotčené stavby bude hrát významnou roli použitý kryt, resp. povrch. [2] Diskontinuita vegetačního krytu v podobě přejezdu může ztlačit výslednou hladinu $L_{Aeq,T}$ (resp. $L_{AE,en}$), a tím způsobit překročení HL pro daný chráněný venkovní prostor stavby, ve srovnání s vegetačním krytem TT. [2]

Nejen změna stávající právní úpravy platná od letošního (2023) července, ale i nová technická řešení snižující emitovaný hluk prokazatelně rozšiřují potenciální prostor pro umístění tramvajových tratí. [1] [13] [14] Jako podklad pro predikci akustické situace, hygienické měření a uspořádání uličního profilu slouží právě technické měření hluku.

Literatura

- [1] EEA Report: Environmental noise in Europe — 2020. European Environment Agency, 2020, . ISSN 1977-8449.

- [2] ŠUROVSKÝ, Jakub. Vliv diskontinuit vegetačního krytu tramvajové trati na úroveň vyzářovaného hluku. Praha, 2023. SVOČ. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Bc. Lenka Lomoz, Ph.D.
- [3] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [4] KAPPIS, Christel a Hendrikje SCHREITER. HANDBOOK Track Greening: Design • Implementation • Maintenance. 2016. Hamburg: Eurailpress, 2016. ISBN 978-3-87154-576-4.
- [5] JAKUBCOVÁ, E. a E. HORVÁTHOVÁ. Costs and Benefits of Green Tramway Tracks. Scientia Agriculturae Bohemica. 2020, **51**(4), 99-106. ISSN 1805-9430. Dostupné z: doi:10.2478/sab-2020-0012
- [6] DSP+RDS RTT a MKS Jugoslávských partyzánů: neveřejný dokument (zdroj DPP). První. Praha: METROPROJEKT Praha, 2011.
- [7] DVZ Tramvajová trať Podbaba - ČD Podbaba, 1. etapa: neveřejný dokument (zdroj DPP). První. Praha: METROPROJEKT Praha, 2011.
- [8] ČSN EN ISO 3095. Akustika - Železniční aplikace - Měření hluku vyzářovaného kolejovými vozidly. 03/2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 52 s. Třídící znak: 280350.
- [9] ČSN ISO 1996-1. Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí: Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení. 02/2017. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 48 s. Třídící znak: 011621.
- [10] ČSN ISO 1996-2. Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí: Část 2: Určování hladin akustického tlaku. 09/2018. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 60 s. Třídící znak: 011621.
- [11] METODICKÝ NÁVOD pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Věstník Ministerstva zdravotnictví České republiky. Praha: MZČR, 2017, **2017**(11), 2-35.
- [12] FOJTÍK, Pavel a Robert MARA. Encyklopedie pražské MHD (2. díl): Katalog vozidel : metro, tramvaje, autobusy, trolejbusy, lanové dráhy. První vydání. Praha: Dopravní podnik hlavního města Prahy, 2017.
- [13] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.: Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Aktuální znění (09.11.2018–30.06.2023), verze 3.
- [14] Nařízení vlády č. 433/2022 Sb.: Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů. Budoucí znění 01.07.2023, verze 1.

Poděkování

Za zaškolení do problematiky hluku z tramvajové dopravy, organizaci a pomoc při akustickém měření v terénu autoři děkují Katedře železničních staveb FSv ČVUT.

Praktický pohled na přínosy technologie aktivního vedení dvojkolí u moderních článkových tramvají

Ing. Jan Vrba¹

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

e-mail_1: vrba@fs.cvut.cz,

Abstrakt

Článek představuje koncepci využití technologie aktivního vedení dvojkolí pro moderní článkové nízkopodlažní tramvaje s neotočnými podvozky. V článku jsou dále představeny a diskutovány výsledky provedených MBS výpočtů simulujících jízdu vozidla vybaveného touto technologií po konkrétní trati v rámci pražské tramvajové sítě. Při porovnání průjezdu touto tratí vozidla s aktivním a pasivním vedením dvojkolí došlo ke snížení indexu opotřebení v průměru o 73%. Článek dále interpretuje dosažené výsledky MBS výpočtů z hlediska konkrétních úspor v provozu tramvaje.

Klíčová slova

aktuátor, aktivní natáčení, podvozek, tramvaj, opotřebení, kontakt kolo – kolejnice, dvojkolí.

A practical look at the benefits of active wheelset steering technology for modern articulated trams

Abstract

The paper presents the concept of using active wheelset steering technology for modern articulated low-floor trams with non-pivoting bogies. The contribution also presents and discusses the results of MBS calculations simulating the travel of a vehicle equipped with active wheelset steering technology through a specific line within the Prague tram network under different boundary condition. In a comparison of passive and active wheelset guidance, a reduction in wear index of 73% on average was achieved. The paper further interprets the achieved results of MBS calculations in terms of specific savings in tram operation.

Keywords

actuator, active steering, bogie, tram, wear, rail-wheel contact, wheelset

1. Úvod

Městské tramvajové tratě vedoucí zejména centry měst jsou často z historických důvodů tvořeny směrovými oblouky s velmi malými poloměry (méně než 25 metrů). Oblouky s ještě menšími poloměry (okolo 15 metrů) lze často nalézt také v depech. Při průjezdu vozidla oblouky s takto malými poloměry dochází k vyčerpání příčných vůlí dvojkolí v koleji a ke vzniku velkých skluzových sil v kontaktu kola a kolejnice. Tyto podélné a příčné síly vedou k nežádoucím jevům v podobě vysokého opotřebení kol a kolejnic a emisím hluku a vibrací. Opotřebení kol a kolejnic má za následek velké náklady jak pro správce infrastruktury, tak provozovatele vozidel. Reprofilace kol, kterou je nutné pravidelně provádět kvůli opotřebení jejich jízdního profilu, a následná výměna obručí kol jsou největším nákladem při údržbě tramvajových vozidel a zásadně se tak podílí na servisní složce nákladů životního cyklu vozidla.

Tratě s oblouky o velmi malých poloměrech také limitují nasazení určitých koncepcí moderních tramvají na tyto tratě, zejména pak článkových vozidel s neotočnými podvozky. Článkové tramvaje s neotočnými podvozky přitom mají mnoho výhod oproti koncepcím s podvozky otočnými, jako je nižší cena, vyšší přepravní kapacita či prostornější interiér nad podvozky. Pokud by bylo možné redukovat jejich zásadní nevýhodu, kterou je vyšší opotřebení kol a kolejnic při průjezdu oblouky, lze předpokládat snížení nákladů na tramvajovou dopravu a zvýšení komfortu pro cestující.

Zlepšení průjezdu tramvají i kolejových vozidel obecně směrovými oblouky malých poloměrů je věnována po dlouhá desetiletí velká pozornost výzkumníků i projektantů vozidel po celém světě. Zatímco v minulosti byla pozornost věnována zejména úpravám čistě mechanickým, v dnešní době se pozornost obrací k aktivně řízeným prvkům v pojezdu kolejového vozidla, pomocí kterých můžeme příznivě ovlivnit jeho interakci s tratí.

V posledních letech došlo k představení několika zajímavých nových technologií využití aktivních prvků pro natáčení dvojkolí do oblouku. Za zmínku stojí zejména systém LiCAS společnosti Liebherr, který pomocí aktuátoru umístěného v kloubu kyvného ramena vedoucího dvojkolí a rámu podvozku natáčí dvojkolí do oblouku [1,2]. Dle dostupných informací je tento systém, i většina dalších výzkumů, však orientována na klasickou železnici. Výjimku tvoří například výzkum v oblasti aktivního natáčení dvojkolí tramvaje společnosti Hyundai Rotem či švýcarský start-up Traila [3] se svou koncepcí aktivně vedeného jednonápravového tramvajového podvozku. Podrobný přehled použití aktivních prvků v pojezdu kolejových vozidel lze nalézt v [4].

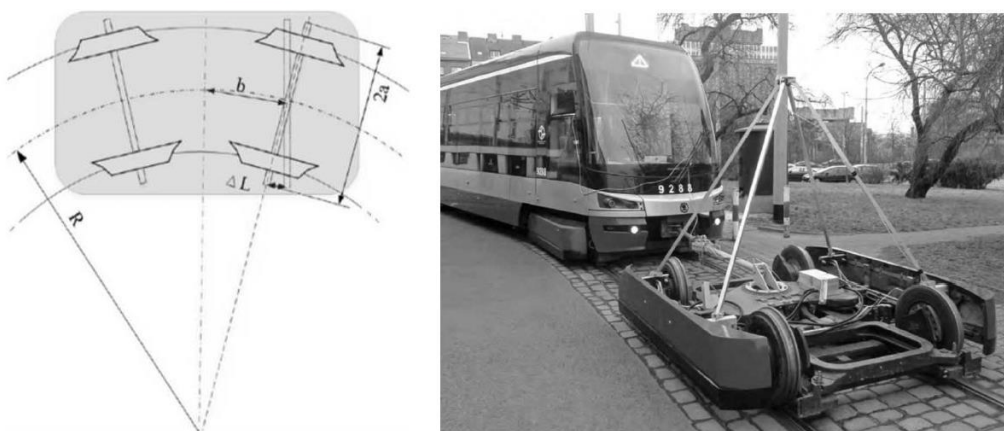
Potenciál aplikace technologie aktivního vedení dvojkolí na tramvajová vozidla je však dle názoru autora značný vzhledem k malým poloměrům směrových oblouků, dále jen oblouků, které vozidla musejí často projíždět. Dále pak vzhledem k provedení velkého množství tramvají s neotočnými podvozky. Lze se také domnívat, že díky velkému pokroku v technologiích směřujících k autonomnímu provozu tramvají, jako je například antikolizní systém či využití digitálního dvojkolového vozidla, bude možné redukovat prozatím

trvající obavy o bezpečnost, robustnost či cenu technologie aktivního vedení dvojkolí.

2. Koncept provozu

Pro aktivní natáčení dvojkolí tramvaje je uvažováno s dopředným řízením aktuátorů v podvozku vozidla. Jako vstupní veličiny algoritmu řídicího výsunu aktuátorů slouží poloměr oblouku R a rychlost vozidla. Natočení dvojkolí do oblouku je dáno výsunem aktuátorů ΔL , který je na základě poloměru oblouku určován dle vzorce (1), ve kterém $2b$ značí rozvor podvozku a $2a$ představuje příčnou vzdálenost aktuátorů natáčejících dvojkolí, viz Obr. 1. vlevo.

$$\Delta L = \frac{a \cdot b}{R} \quad (1)$$



Obr. 1. Výpočet výsunu aktuátoru při průjezdu obloukem [5] (vlevo), tvorba digitální mapy trati [6] (vpravo)

Rychlost vozidla je s dostatečnou přesností měřena již na dnešních vozidlech. Poloměr oblouku je pak na základě polohy vozidla na trati získáván z databáze trati, která je nahrána ve vozidle. Databáze trati obsahuje informace o jednotlivých úsecích projížděné trati a může být získána například speciálním měřicím zařízením, kterým je trať projeta, a naměřená data jsou následně zpracována do databáze a nahrána do vozidla. Digitální mapa trati nahraná ve vozidle je dnes v některých tramvajových provozech využívána pro mazání okolků kol, oznamování zastávek či kontrolu rychlosti vozidla. [6]

Informace o poloměru oblouku je tedy získávána na základě lokalizace vozidla na trati. Dostatečně přesné určení polohy vozidla na trati v městském prostředí může být problematické, nicméně lze předpokládat, že v dnešní době již technologie pokročila dostatečně k dosažení potřebných přesností. Využití může být například určování polohy na základě high definition (HD) map v kombinaci s globálním navigačním satelitním systémem (GNSS) a odometrií. Tyto zdroje mohou být pak pro dosažení vyšší přesnosti a robustnosti

lokalizace kombinovány přes Kalmanův filtr. Jinou možností může být například využití odometrie a technologie radiofrekvenční identifikace (RFID). [7, 8]

Vzhledem k bezpečnostním rizikům a rizikům zvýšeného opotřebením kol a kolejnic v případě špatné hodnoty vstupní veličiny (poloměru oblouku) do algoritmu řídicího natáčení dvojkolí je vhodné tuto veličinu ověřit z více nezávislých zdrojů. Tento přístup je dlouhodobě aplikován například v leteckém průmyslu. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodné, aby poloměr nadcházejícího oblouku byl ověřován pomocí sensoriky na čele vozidla (LiDAR, kamera). Řídicí systém bude schopný z dat získaných ze sensoriky na čele vozidla detekovat kolejnicové pásy a vypočítat poloměr oblouku. Tato technologie je dostupná již v dnešní době [9]. Takto získaný poloměr oblouku bude tedy porovnán s hodnotou v databázi trati, a pokud se hodnoty výrazněji nebudou shodovat, nedojde k natočení dvojkolí a vozidlo projede úsek sníženou rychlostí s aktuátory v nominální poloze. Lze předpokládat, že výše zmíněné senzory na čele vozidla budou na vozidle umístěny primárně za jiným účelem (např. antikolizní systém) a nedojde tak ke zvýšení ceny systému aktivního natáčení.

3. MBS výpočet

Pro validaci navrženého konceptu aktivního natáčení byl v MBS programu Simpack vytvořen model článkové tramvaje s neotočnými podvozky s aktivním vedením dvojkolí, který byl propojen s modelem řízení aktuátorů v programu Matlab Simulink. Tyto dva programy si tak v každém časovém kroku simulace předávají potřebné informace. Z programu Simpack je v každém časovém kroku předávána informace o poloze vozidla na trati a rychlosti vozidla, z programu Simulink je pak předávána do programu Simpack hodnota natočení aktuátorů. Princip kosimulace zobrazuje Obr. 2.



Obr. 2. Princip kosimulace využití k MBS výpočtům

Pro vyhodnocení vlivu aktivního natáčení dvojkolí bylo využito indexu opotřebením, který je definován dle (2).

$$W = T_x \cdot v_x + T_y \cdot v_y \quad (2)$$

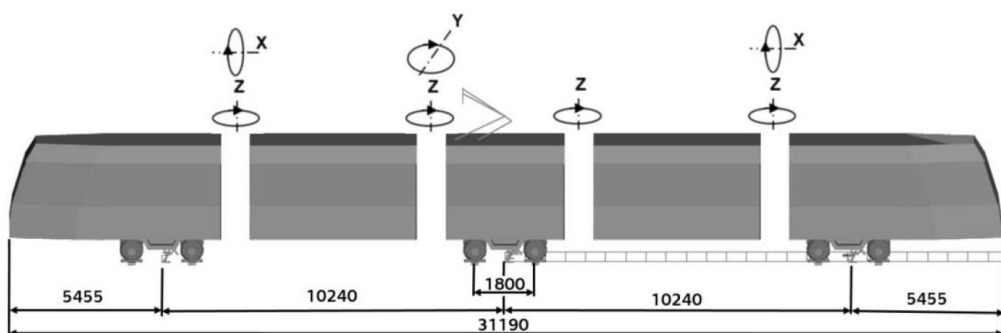
V rovnici (2) T_x značí podélnou skluzovou sílu, T_y je příčná skluzová síla, v_x je podélný poměrný skluz a v_y je příčný poměrný skluz. Jednotkou indexu

opotřeбенí je Newton. Při integraci indexu opotřeбенí po délce tratě lze dostat energii disipovanou v kontaktu kolo - kolejnice.

3.1. Model vozidla

Pro vývoj systému aktivního natáčení bylo vybráno vozidlo koncepce „multigelenk“ tedy vozidlo s pěti články a třemi neotočnými podvozky. Takováto koncepce tramvaje odpovídá nejčastějšímu řešení moderních článkových nízkopodlažních tramvajů ve světě. Toto řešení tramvaje se také jeví jako nejvýhodnější pro aplikaci technologie aktivního natáčení, jelikož radiální stavění dvojkolí do oblouku může výrazně zlepšit problémy tohoto vozidla při průjezdu oblouky malých poloměrů, jako jsou velké příčné síly v kontaktu kolo - kolejnice či emise hluku a vibrací. Naopak výhody vozidla, kterými jsou zejména vysoká kapacita, širší ulička nad podvozky či nižší cena oproti vozidlům s otočnými podvozky zůstanou zachovány.

Základní parametry tramvaje pro vytvoření multi-body dynamics simulation (MBS) modelu vozidla jsou shrnuty v TAB 1. Parametry tramvaje byly určeny na základě základních koncepčních výpočtů, zkušeností autora a z veřejně dostupných zdrojů [10].

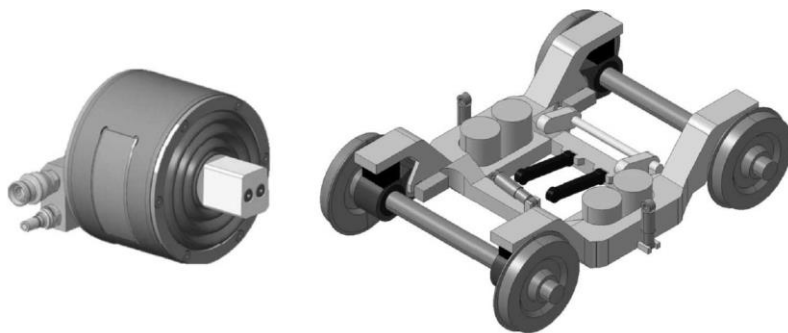


Obr. 3. MBS model vozidla

Tab. 1 Základní parametry MBS modelu vozidla

Hmotnost vozidla (ELE / EL4)	44,8 t / 56,8 t
Vertikální tuhost pružiny sekundárního vypružení	500 N/mm
Příčná a podélná tuhost pružiny sekundár. vypružení	300 N/mm
Příčné a podélné tlumení sekundárního vypružení	29 000 Ns/mm
Celková torzní tuhost torzního stabilizátoru	600 kNm/rad
Vertikální tuhost pružiny primárního vypružení	2 200 N/mm
Podélná tuhost pružiny primárního vypružení	200 N/mm
Příčná tuhost pružiny primárního vypružení	60 N/mm
Podélná a vertikální tuhost silentbloku kyvného ramene	25 kN/mm
Příčná tuhost silentbloku kyvného ramene	5 kN/mm
Torzní tuhost silentbloku kyvného ramene	60 Nm/deg
Tlumení pružiny primárního vypružení	5000 Ns/m
Příčné tlumení pružiny primárního vypružení	300 Ns/mm
Podélné tlumení pružiny primárního vypružení	600 Ns/mm
Rozvor podvozku (2b dle Obr. 1)	1 800 mm
Příčná báze umístění aktuátorů (2a dle Obr. 1)	1 170 mm

Podvozek je řešen jako neotočný, avšak díky dorazům s progresivní charakteristikou je umožněno natočení podvozku oproti skříni vozidla o ± 2 stupně. Vedení dvojkolí je řešeno pomocí kyvného ramene. Aktuátor aktivně natáčející dvojkolí do oblouku je umístěn v kloubu spojujícím kyvné rameno s rámem podvozku. Toto řešení umístění a technického řešení aktivního silentbloku představila v nedávné době firma Liebherr ve svém systému aktivního natáčení dvojkolí LiCAS [1,2]. Primární vypružení je uvažováno pomocí pryžokovových pružin. Základní parametry vypružení jednotlivých částí podvozku jsou shrnuty v TAB. 1. Rychlost výsuvu aktuátoru je uvažována 7 mm/s dle [2]. Model aktuátoru nebyl pro dále představené simulace více rozpracován a bude zpřesňován v dalších fázích výzkumu. Maximální hodnota výsuvu aktuátoru nebyla omezena.



Obr. 4. Aktivní silentblok Liebherr [2] (vlevo), zjednodušený model podvozku pro MBS výpočty (vpravo)

3.2. Model trati

Aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího odladění a nastavení algoritmu řídicího aktivní prvky v pojezdu tramvaje byla pro dynamické simulace vytvořena mapa trati, která svým profilem odpovídá reálné tramvajové trati. Jako vhodná trať pro zkoušení algoritmu aktivního natáčení byla zvolena pražská tramvajová trať Václavské náměstí – Národní Divadlo – Újezd – Sídliště Řepy. Tuto trať lze považovat za reprezentanta klasické tramvajové trati, která vede z periferie do centra města, a je na ní velká přepravní poptávka. Valná většina trati je tvořena přímými úseky či úseky s velkými poloměry oblouku, nicméně zejména v centru města se na trati nachází oblouky s velmi malými poloměry (R_{20}). Právě pro takovou trať se jeví jako vhodné použití vozidla zvolené koncepce „multigelenk“ v případě, že by takové vozidlo bylo schopno projíždět oblouky s malými poloměry bez zvýšeného opotřebení kol a kolejnic. Horizontální i vertikální profil trati byl v SW Simpack vytvořen na základě výkresů trati získaných od Dopravního podniku hl. města Prahy (DPP). Délka úseku převedeného do programu Simpack je 10 641 metrů. Horizontální profil trati z hlediska délky a počtu oblouků různých poloměrů a k nim příslušných přechodnic zobrazuje TAB. 2.

Tab. 2 Horizontální profil trati – zastoupení oblouků a přechodnic

Interval poloměrů [m]	Počet oblouků	Délka oblouků [m]	Délka přechodnic [m]
R20 – R30	4	103	0
R30 – R50	9	67	30
R50 – R80	4	183	53
R80 – R150	8	318	188
R150 – R300	12	798	363
R300 - R600	13	1227	252
R600 - R1000	6	331	92
> R1000	12	590	11
Přímá trať	58	6 035 m	
Celková délka trati		10 641 m	



Obr. 5. Tramvajová trať Václavské náměstí – Sídliště Řepy použitá pro MBS výpočty (zdroj: mapy.cz)

3.3. Okrajové podmínky MBS simulací

Simulace průjezdu vozidla zkušební trati byly provedeny vícekrát za různých okrajových podmínek výpočtu, které představují 8 různých kombinací (scénářů), aby bylo možné určit jejich vliv na snížení opotřebení kol při porovnání pasivního a aktivního vedení dvojkolí. Simulace jízdy vozidla popsanou trati tak byla provedena celkem 16 krát. Simulován byl průjezd vozidla trati za různé kombinace okrajových podmínek, jak při pasivním, tak aktivním vedením dvojkolí. Měněnými okrajovými podmínkami byly:

- rychlost vozidla – simulován byl průjezd vozidla konstantní rychlostí 15 km/hod a poté rychlostí odpovídající nevykompenzovanému příčnému zrychlení 1 m/s^2 , případně maximální rychlosti vozidla 70 km/hod,
- koeficient tření v kontaktu kola a kolejnice – byly použity limitní hodnoty 0,15 a 0,4,
- naložení vozidla – prázdné vozidlo (ELE), provozně obsazené vozidlo při úvaze 4 stojících cestujících na m^2 (EL4).

Simulace byly provedeny se žlábkovou kolejnicí s profilem NT1 a profilem kola odpovídajícím profilu používaném DPP. Nerovnosti kolejnic ani vliv pohonu vozidla nebyly uvažovány.

4. Výsledky simulací

Po provedení optimalizace algoritmu řídicího výsuv aktuátorů, která spočívala zejména v nalezení optimální vzdálenosti vozidla před vjezdem do oblouku pro začátek natáčení dvojkolí, bylo provedeno celkem 16 simulací průjezdu popsanou tratí za různých okrajových podmínek popsaných v kapitole 3.3. Dosažené výsledky v podobě indexu opotřebení a disipované energie v kontaktu kola a kolejnice u všech kol vozidla zobrazuje TAB. 3. Z dosažených hodnot je patrné, že dle předpokladů největší snížení indexu opotřebení a tedy i opotřebení kol a kolejnic dojde při vysokém koeficientu tření. Výraznějšího procentuálního snížení bylo dosaženo při jízdě konstantní rychlostí 15 km/hod, což lze vysvětlit zejména dostatečným časem pro výsuv aktuátorů do každého oblouku i delší dobou průjezdu oblouky a tedy delším působením příčných a podélných skluzových sil v kontaktu kolo - kolejnice. I pro okrajové podmínky z druhé strany provozního spektra přinesla technologie významný přínos. V průměru došlo ke snížení indexu opotřebení na všech kolech tramvaje o 73 %, u disipované energie v kontaktu kola a kolejnice pak o 75 % při jízdě s aktivním natáčením dvojkolí oproti jízdě s klasickým vypružením.

TAB. 3 Výsledky simulací průjezdu zkušební tratí

Vedení dvojkolí	Rychlost [km/h]	Naložení	Třecí koef.	Index opotřebení [N]	Snížení indexu opotř. [%]	Disipovaná energie [J]	Snížení disip. energie [%]
pasivní	max	EL4	0,4	1 124 368		7 460 732	
pasivní	max	EL4	0,15	342 539		2 517 519	
pasivní	max	ELE	0,4	886 817		5 922 422	
pasivní	max	ELE	0,15	266 268		1 937 006	
pasivní	15	EL4	0,4	1 525 949		6 301 704	
pasivní	15	EL4	0,15	617 168		2 571 533	
pasivní	15	ELE	0,4	1 512 409		6 358 121	
pasivní	15	ELE	0,15	496 158		2 067 325	
aktivní	max	EL4	0,4	338 534	70	1 601 659	79
aktivní	max	EL4	0,15	141 621	59	1 055 892	58
aktivní	max	ELE	0,4	270 397	70	1 055 203	82
aktivní	max	ELE	0,15	111 156	58	812 322	58
aktivní	15	EL4	0,4	381 586	75	1 589 942	75
aktivní	15	EL4	0,15	167 917	73	699 654	73
aktivní	15	ELE	0,4	304 153	80	1 267 304	80
aktivní	15	ELE	0,15	134 726	73	561 358	73
pasivní vedení dvojkolí celkem				6 771 676		35 136 362	
aktivní vedení dvojkolí celkem				1 850 090	73	8 643 334	75

5. Praktická interpretace dosažených výsledků

U kolejových vozidel dochází během jejich provozu k opotřebení jízdnicích ploch kol a je nutno tak obnovovat jejich jízdnicí profil pomocí soustružení. V rámci reprofilace kola je ubírán materiál a zmenšuje se tak průměr kola. Po dosažení předepsaného limitu pro minimální průměr kola dojde k výměně kola či pouze obruče kola za nové. Životnost obručí kol je do značné míry závislá na koncepci a konstrukci vozidla či města, ve kterém jsou vozidla provozována. Podle dostupných informací [11] jsou současná vozidla s neotočnými podvozky schopna ujet přibližně 270 000 kilometrů, než je třeba vyměnit obruče kol. [11] shrnuje kilometrický proběh v 6 různých městech u vozidel s nezávisle otočnými koly, nicméně na základě zkušeností autora jsou tyto hodnoty velmi podobné i u vozidel s klasickými dvojkolými.

Na opotřebení kol mají kromě průjezdu oblouky vliv i další faktory, jako je jízda po okolku, jízda přes výhybky, pískování jízdnicích ploch apod. a nelze tedy předpokládat, že dosažené hodnoty snížení indexu opotřebení představují prodloužení servisních intervalů nebo počtu ujetých kilometrů do výměny obručí. V [1] se uvádí, že 50% snížení disipované energie ve styku kola

s kolejnicí vede k prodloužení servisních intervalů přibližně o 30 %. Při použití této korelace povede 75 % snížení disipované energie, které bylo dosaženo při představených výpočtech, ke zhruba 45 % prodloužení servisních intervalů a počtu ujetých kilometrů vozidla na jedné oboustranné dráze. Vzhledem k této hodnotě zvýšení životnosti kol by vozidla byla schopna ujet na jedné oboustranné dráze přibližně 390 tisíc kilometrů.

Vzhledem k předpokládanému cílovému ročnímu nájezdu 70 tisíc kilometrů a životnosti vozidla 30 let lze předpokládat, že obruče kol budou za dobu životnosti vozidla vyměněny osmkrát. Pokud dojde k aplikaci aktivního natáčení dvojkolí, budou obruče vyměněny pouze pětkrát za dobu životnosti vozidla. Uvažujeme-li vozidlo se třemi podvozky (tj. 12 kol), dojde k úspoře celkem 36 obručí a nákladů na jejich výměnu. Výměna obručí přitom obnáší vyvázání podvozků z vozidla a demontáž dvojkolí z podvozku. Dochází tak k dlouhému odstavení vozidla a náklady na tento servisní úkon nejsou zanedbatelné. Další významnou úsporou budou prodloužené intervaly mezi reprofilací kol. Značné úspory lze předpokládat i na straně infrastruktury, kdy dojde ke snížení nákladů na údržbu kolejí.

Jedním z nejvýznamnějších přínosů je také úspora trakční energie. Na základě dosaženého průměrného snížení hodnoty disipované energie a předpokladu o ročním nájezdu 70 tisíc kilometrů dojde na jednom vozidle k úspoře 6 MWh trakční energie ročně.

Na druhou stranu lze očekávat mírné zvýšení servisních nákladů na údržbu systému aktivního vedení dvojkolí a je třeba vzít v úvahu i spotřebu energie aktuátorů. Lze však předpokládat, že tyto faktory bude možné přesněji vyčíslit až po nasazení technologie aktivního vedení dvojkolí do běžného provozu.

6. Závěr

Tento článek představuje výzkum přínosu použití aktivně řízených prvků v podvozku nízkopodlažní článkové tramvaje pro účely aktivního vedení dvojkolí. Dostatečné robustnosti navrhovaného systému napomáhá skutečnost, že do algoritmu řízení aktivních prvků vstupují pouze veličiny, které lze bezpečně měřit s dostatečnou přesností a bez zvýšení nákladů na vybavení vozidla senzorikou. Dále je navrženo získat veličinu ovlivňující řízení dvojkolí, tj. poloměr oblouku, z databáze trati a ověřit její hodnotu pomocí senzorů na čele vozidla. Pro aktivní řízení dvojkolí byl použit koncept aktivního silentbloku inspirovaný řešením společnosti Liebherr pro konvenční kolejová vozidla. Podle názoru autora je reálné zabudovat tento druh aktuátoru i do tak prostorově omezené konstrukce, jakými jsou současné podvozky nízkopodlažních tramvají.

Představený systém byl aplikován na model kloubové tramvaje koncepce "multigelenk" a byl simulován průjezd vozidla s aktivním a pasivním primárním vypružením po trati Václavské náměstí - Sídliště Řepy. Porovnáním aktivního a pasivního vedení dvojkolí bylo dosaženo velmi dobrých výsledků při různých okrajových podmínkách výpočtu, kdy se index opotřebení v kontaktu kola

s kolejnicí snížil v průměru o 73 % ve srovnání s vozidlem s konvenčním vypružením.

Samotný model aktivního vedení dvojkolí a jeho řízení bude dále zdokonalován a zpřesňován, nicméně prezentované výsledky již nyní jasně ukazují, že technologie aktivního vedení dvojkolí je velmi vhodná pro moderní kloubové tramvaje a může přispět k dalšímu rozvoji tramvajové dopravy. Hlavním přínosem této technologie je snížení opotřebení kol a kolejnic, což dopravním podnikům přinese značné úspory a bude tak mít zásadní vliv na náklady životního cyklu vozidla. Dalšími významnými přínosy jsou úspory trakční energie nebo snížení emisí hluku a vibrací při průjezdu oblouky. Za další přínosy lze považovat možnost dalšího rozšíření počtu vozidel s neotočnými podvozky, které jsou levnější, mají vyšší kapacitu a jsou pro cestující pohodlnější z hlediska interiéru vozidla než vozidla s otočnými podvozky.

Další výzkum bude zaměřen především na zpřesnění modelu aktuátorů, a zkoumání vlivu nepřesností v určování polohy vozidla na trati na opotřebení kol a bezpečnost provozu. Dále je plánována validace navrženého řídicího algoritmu a dosažených výsledků MBS výpočtů na experimentálním kladkovém stavu [12] v laboratořích Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Literatura

- [1] *LiCAS passes test successfully* [online]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/latest-news/news-press-releases/detail/licas-passes-test-successfully.html>.
- [2] *Electrohydraulic Controlled Axle Steering (eCAS)* [online]. In: . [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/transportation/downloads/products/liebherr-electrohydraulic-controlled-axle-steering-ecas.pdf>
- [3] *Traila* [online]. [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.traila.ch/en/>
- [4] VRBA, J. and KOLÁŘ, J.. Možnosti aplikace aktivních prvků v kolejových vozidlech. *Nová železniční technika*. 2022, 2022(4), 24-32. ISSN 1210-3942.
- [5] FU, Bin a Stefano BRUNI. Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2022, 60(3), 810-834. doi:10.1080/00423114.2020.1838563
- [6] HORŇÁK, R. EMA umí mazat či omezit rychlost. *DP Kontakt*. 2018(1), 12-14.
- [7] ZHOU, Yukun, Qijin CHEN a Xiaoji NIU. Kinematic Measurement of the Railway Track Centerline Position by GNSS/INS/Odometer Integration. *IEEE Access* [online]. 2019, 7, 157241-157253. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2946981
- [8] KUUTTI, Sampo, Saber FALLAH, Konstantinos KATSAROS, Mehrdad DIANATI, Francis MCCULLOUGH a Alexandros MOUZAKITIS. A Survey of the State-of-the-Art Localization Techniques and Their Potentials for Autonomous Vehicle Applications. *IEEE Internet of Things Journal* [online]. 2018, 5(2), 829-846. ISSN 2327-4662.
- [9] RISTIĆ-DURRANT, Danijela, Marten FRANKE a Kai MICHELS. A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways. *Sensors* [online]. 2021.
- [10] ČIHÁK, Stanislav. *Optimalizace parametrů článkové nízkopodlažní tramvaje*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jan Kalivoda.
- [11] MAYER, Arnd. Wheel sets or independently rotating wheels – from theory to practice [online]. 12 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:2dbbe04aeb88674e9b6c332c43d452456b59019e/wheel-sets-independent-en.pdf>
- [12] KALIVODA, Jan, Petr BAUER a Zdeněk NOVÁK. Assessment of Active Wheelset Steering System Using Computer Simulations and Roller Rig Tests. *Applied Sciences* [online]. 2021, 11(24) [cit. 2023-07-14]. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app112411727

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/161/OHK2/3T/12.

Název: **Sborník příspěvků konference Želva 2023**

Editor: Ing. Magdalena Křečková

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze

Zpracovala: Fakulta stavební
Katedra železničních staveb
Thákurova 7, Praha 6 – Dejvice, 166 29
(+420) 224 355 460

Tisk: Powerprint s.r.o.
Brandejsovo náměstí 1, Praha – Suchdol, 165 00

ISBN: 978-80-01-07244-8

Vydání: první

Náklad: 25 výtisků

Počet stran: 112

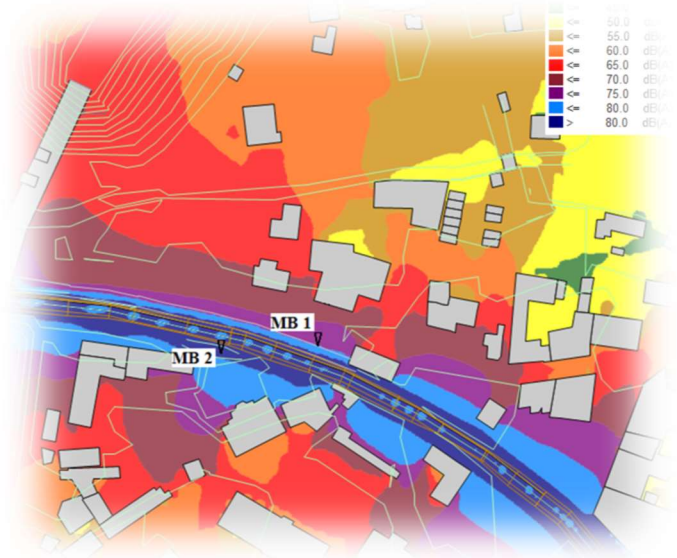
Praha 2023



KATEDRA
ŽELEZNIČNÍCH STAVEB
FAKULTA STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE



**PRÁCE, VÝVOJ A MĚŘENÍ
V OBLASTI
ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU,
SPODKU A HLUKU
Z KOLEJOVÉ DOPRAVY**



(+420) 224 355 460
K137@fsv.cvut.cz

**KATEDRA
ŽELEZNIČNÍCH STAVEB**

Thákurova 2077/7
Praha 6 – Dejvice
166 29



ISBN 978-80-01-07244-8