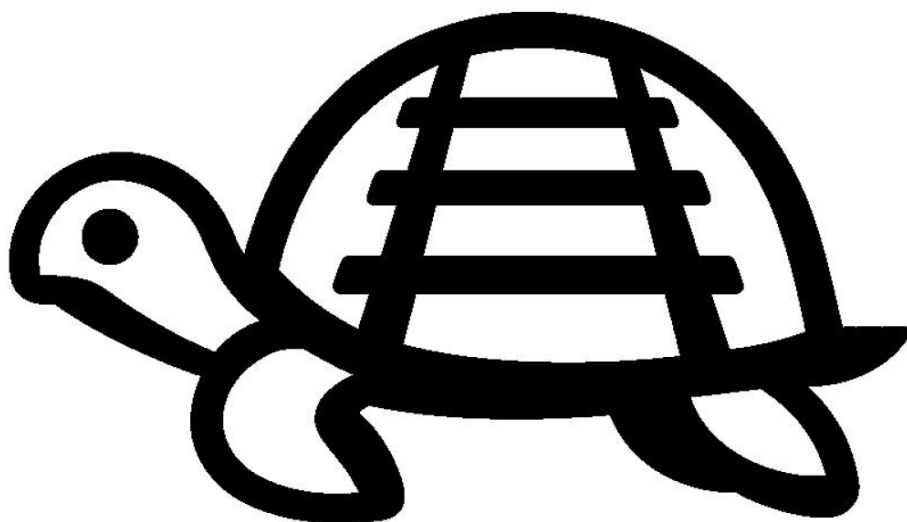


SBORNÍK STUDENTSKÉ VĚDECKÉ KONFERENCE ŽELEZNIČNÍ VÝZKUMNÉ AKTIVITY

7. ročník

9. ZÁŘÍ 2025

PRAHA



ŽELVA 2025



Sborník příspěvků ŽELVA 2025

Studentská vědecká konference
Železniční výzkumné aktivity

7. ročník
9. září 2025
Praha

GARANT KONFERENCE/SUPERVISOR

Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

EDITOR SBORNÍKU/EDITOR

Ing. Petra Váňová

PŘÍPRAVNÝ VÝBOR KONFERENCE/ORGANIZING COMMITTEE

Ing. Ondřej Bret
Ing. Petra Váňová

POŘADATEL

Katedra železničních staveb, Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 2077/7, Praha 6 – Dejvice, 166 29
<http://kzs.fsv.cvut.cz>
tel.: (+420) 224 354 689

SPONZOR KONFERENCE

Strabag a.s.

Jsme hrdí, že můžeme podporovat konferenci ŽELVA 2025.

Těší nás, že přispíváme k propojení akademické sféry a praxe v oblasti železniční infrastruktury.

Pokud Vás láká práce na zajímavých stavebních projektech, rádi Vás přivítáme v našem týmu – na plný úvazek i na brigádách.

Kontakt: rudolf.spachta@strabag.com

STRABAG
WORK ON PROGRESS

Úvodní slovo

Vážené kolegyně, vážení kolegové, milí studenti,

dostává se Vám do rukou sborník ze 7. ročníku konference ŽELVA – Železniční výzkumné aktivity, tedy ze setkání studentů doktorských a magisterských studijních programů, vysokoškolských pedagogů a odborníků z praxe.

Konference byla opět zaměřena na aktuální trendy ve výzkumu a vývoji konstrukcí a materiálů u kolejové infrastruktury. Jednotlivé příspěvky otevřely diskusi o rozvoji kolejové dopravy v celé její šíři. Prezentující tak měli nejen příležitost rozšířit si dovednosti v oblasti prezentace výsledků výzkumné činnosti, ale také navnímat komentáře a poznatky dalších účastníků s širokým odborným rozhledem, které jim mohou pomoci při dalším zacílení, příp. dokončení výzkumných témat a závěrečných studentských prací. Pozornost byla věnována též hledání cest, jak nové poznatky převést do praxe.

Konference by se nemohla uskutečnit bez patřičného finančního zajištění. Děkuji Fakultě stavební ČVUT za poskytnutý příspěvek. Zvláštní poděkování patří společnosti Strabag a.s. za sponzorský příspěvek, zajištění exkurze na stavbu Masarykova nádraží i za přednesený příspěvek, kterým byl zdůrazněn význam propojení výuky a výzkumu s praxí. Děkuji také členům organizačního výboru konference, kteří se podíleli na přípravě a zdárném průběhu konference. Jejich nasazení a kreativita byly klíčové pro to, aby se ŽELVA mohla uskutečnit v obvyklém standardu, který již znáte z minulých ročníků.

Rád konstatuji, že za uplynulých 7 let došlo k postupné přeměně spontánního studentského setkání do podoby zavedené studentské konference. Věřím, že stávající platforma umožňující otevřenou, živou a interdisciplinární diskusi nad řešenými tématy je funkční a příslibem

pro konání dalších ročníků konference ŽELVA s širokým zastoupením tematicky blízkých univerzit.

Nechť Vám tento sborník slouží jako přehledný souhrn poznatků, k němuž se budete rádi vracet.

Těším se na shledání při příštím, osmém ročníku konference.

Ing. **Leoš Horníček**, Ph.D.

Katedra železničních staveb

Fakulta stavební ČVUT

Obsah

Čížek, J. Bezbariérová řešení pro železniční stanice v regionech	7
Dušek, E. Porovnání metod pro hodnocení kvality geometrie koleje	15
Váňová, P.; Lomoz, L. Městská protihluková clona u tramvajové trati	27
Krejčí, J. Stanovení hodnot pro rozhodování o nasazení akumulátorových jednotek nebo elektrizaci tratě na základě dotazníkového šetření	37
Horák, M.; Kuchár, M.; Wapiennik, T. Rychlost nákladních vlaků v kolejových spojeních a rozvětveních	57
Vrba, J. Vliv přesnosti lokalizace tramvaje na trati na benefity aktivního natáčení dvojkolí	66

Bezbariérová řešení pro železniční stanice v regionech

Ing. Jiří Čížek¹

Fakulta dopravní ČVUT v Praze

Konviktská 20, 110 00, Praha 1

e-mail_1: cizekji4@fd.cvut.cz

Abstrakt

Tento příspěvek představuje aktuální poznatky při návrhu nástroje pro podporu rozhodování zaměřeného na volbu optimální konfigurace nástupišť v železniční stanici obsluhované převážně regionální dopravou.

Klíčová slova

Bezbariérovost, nástupiště, úrovnový centrální přechod, železnice v regionech.

Barrier-free solutions for regional railway stations

Abstract

This paper presents current findings in the design of a decision support tool focused on selecting the optimal configuration of platforms at a railway station served mainly by regional transport.

Keywords

Accesibility, platform, level-crossing, regional railway.

1. Úvod

Problematika bezbariérovosti v železniční dopravě v několika posledních desetiletích velmi významně ovlivňuje trendy v navrhování zařízení pro cestující. Zatímco na tratích mezinárodního či celostátního významu s vysokou intenzitou provozu vlaků lze uvažovat výhradně s mimoúrovňovým přístupem na nástupiště, na tratích regionálního významu je zřizování podchodu či nadchodu spíše výjimkou, protože tak rozsáhlý stavební zásah je při nižší frekvenci cestujících i spojů obtížně ekonomicky obhajitelný. Z toho důvodu existuje snaha nalézt řešení, které i při nižší vytíženosti železniční stanice zajistí při relativně nízkých investičních i provozních nákladech plnou

bezbariérovost a v rámci možností co nejvyšší bezpečnost. Postupem času se tak objevují různé inovativní přístupy k navrhování podobných stanic.

Cílem disertační práce autora je sestavení nástroje pro podporu rozhodování, který z katalogu typových řešení doporučí na základě vstupních parametrů nejvhodnější variantu, která nejlépe naplní stanovené požadavky. Tento příspěvek prezentuje dosavadní poznání v této problematice.

2. Typová řešení

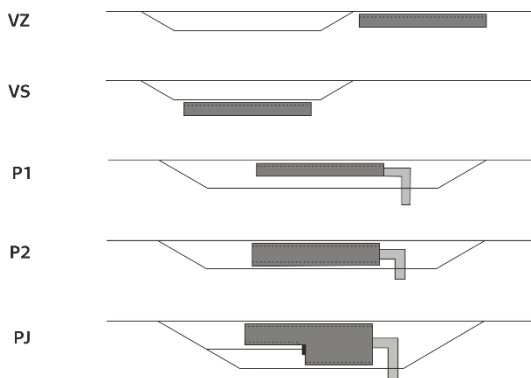
Okruh řešených staničních konfigurací byl definován jako železniční stanice s jednou až třemi nástupními hranami a regionálním charakterem provozu. Rozsáhlejší železniční stanice nejsou zahrnuty vzhledem k velkému množství přípustných konfigurací a individuálnímu přístupu při navrhování takových stanic.

Různé modifikace typových konfigurací, např. s využitím kusých kolejí nebo doplněním kolejových spojek, jsou považovány za typy odvozené z katalogových variant. Specifickým případem je nástupiště poloostrovní oboustranné s jazykem, které je považováno za katalogovou variantu i přesto, že v základní konfiguraci neumožňuje úplný dopravní program.

2.1. Skladebné prvky

Bylo uvažováno s pěti skladebnými prvky (typy nástupišť), které lze při sestavování nástupištní konfigurace využít. Tyto prvky částečně vychází z normy ČSN 73 4959 [1].

- VZ – vnější v záhlaví. Nástupiště vně kolejiště umístěné v úseku mezi krajní výhybkou a hranicí dopravní.
- VS – vnější ve staniční koleji. Nástupiště vně kolejiště přiléhající ke staniční koleji.
- P1 – poloostrovní jednostranné. Nástupiště mezi kolejemi přístupné pouze po úrovnovém centrálním přechodu s jednou nástupní hranou.
- P2 – poloostrovní oboustranné. Nástupiště mezi kolejemi přístupné pouze po úrovnovém centrálním přechodu se dvěma protilehlými nástupními hranami
- PJ – poloostrovní s jazykem. Nástupiště se třemi nástupními hranami, kdy dvě hrany jsou umístěny sériově za sebou u různých kolejí a třetí je vůči nim umístěna paralelně.



Obr. 1 Uplatňované skladebné prvky

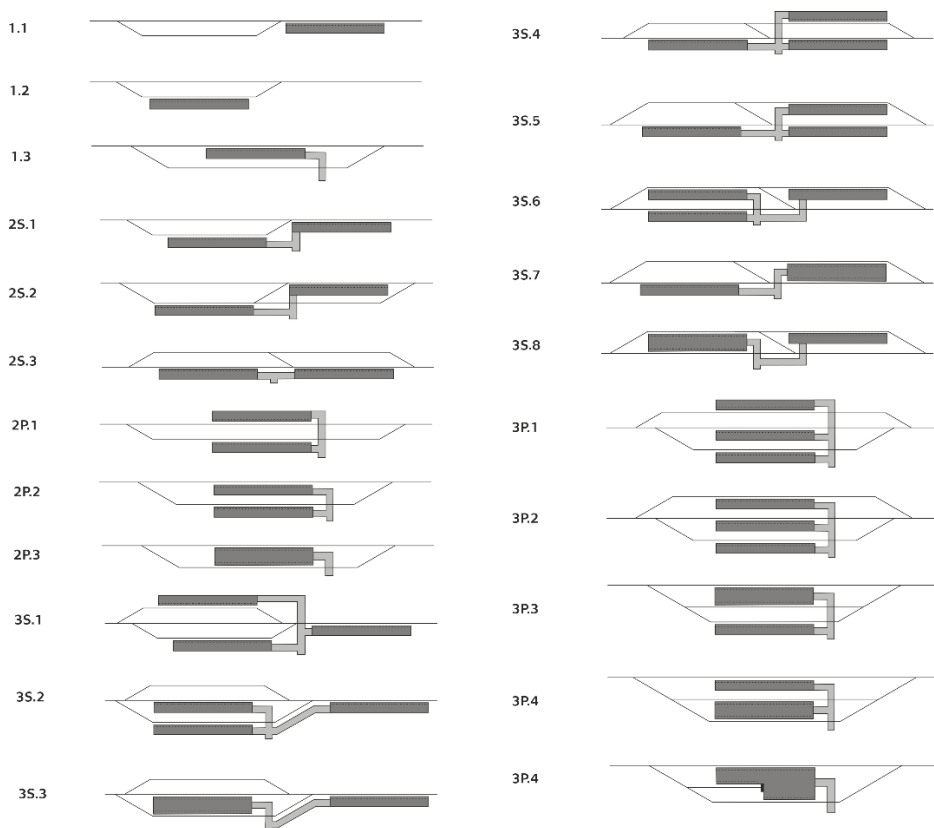
Zároveň bylo uvažováno jak se sériovým uspořádáním nástupišť, tj. vysunutím jednoho z nástupišť do předsunuté pozice vůči ostatním, tak s paralelním uspořádáním, kdy jsou nástupiště umístěna v podélném směru do stejné úrovně, nebo se alespoň částečně překrývají.

2.2. Katalog typových řešení

Byly prověřeny všechny kombinace výše popsaných skladebných prvků, které lze zkonstruovat. Výstupem je 22 různých katalogových konfigurací, z toho 3 pro stanice s 1 nástupní hranou, 6 konfigurací se dvěma nástupními hranami a 13 variant pro 3 nástupní hrany.

Tab. 1 Katalog typových řešení

Označení	Počet nást. hran	Konfigurace	Užité prvky					Příklad realizace
			VZ	VS	P1	P2	PJ	
1.1	1	-	1					Nové Údolí
1.2	1	-		1				Solnice
1.3	1	-			1			Svatava
2S.1	2	Sériová	1	1				Praha-Zličín
2S.2	2	Sériová	1		1			
2S.3	2	Sériová		2				Žalostice
2P.1	2	Paralelní		2				Silůvky
2P.2	2	Paralelní		1	1			Nučice
2P.3	2	Paralelní				1		Český Krumlov
3S.1	3	Sériová	1	2				
3S.2	3	Sériová	1	1	1			
3S.3	3	Sériová	1			1		
3S.4	3	Sériová		3				
3S.5	3	Sériová		2	1			Hlinsko v Čechách
3S.6	3	Sériová		1	2			
3S.7	3	Sériová		1		1		Uničov
3S.8	3	Sériová			1	1		
3P.1	3	Paralelní		2	1			
3P.2	3	Paralelní		1	2			Raspenava
3P.3	3	Paralelní		1		1		Černý Kříž
3P.4	3	Paralelní			1	1		Častolovice
3P.5	3	-					1	Václavice



Obr. 2. Katalog typových řešení.

3. Metodika hodnocení

3.1. Rešerše odborné literatury

Hlavním cílem práce je sestavení rozhodovacího nástroje. Jedním z přístupů při rozhodování je optimalizace [2]. Z matematického hlediska spočívá úloha optimalizace v nalezení lokálního minima ve specifikovaném prostoru [3].

Vzhledem k tomu, že řešené téma lze hodnotit z více aspektů, jako nejvhodnější nástroj se jeví metody multikriteriálního rozhodování, též multikriteriální analýzy (MCDM). Obecně je cílem těchto metod řešení strukturálních, rozhodovacích a plánovacích kroků tak, aby v případě, že daná oblast zahrnuje mnoho kritérií, bylo možné nalézt optimální řešení na základě preferencí rozhodujících osob. Navíc v podobných případech lze expertně přidělit různé váhy kritériím v závislosti na důležitosti daného kritéria pro daný případ. Proces může být popsán jako volba nejlepší (nejpreferovanější) alternativy ze sady základních alternativ. K těmto alternativám je přiřazena sada kritérií, která zhodnocují všechny řešené alternativy. Kritéria se mohou

lišit svými jednotkami, nemusí mezi sebou mít žádnou vazbu a mohou být i protichůdná. Těmito kritériím následně mohou být přiřazeny váhy [4].

Z prověřovaných metod pro vyhodnocení multikriteriální analýzy se jako nevhodnější jeví metoda Multi-attribute utility theory (MAUT – metoda užitku více atributů), která prostřednictvím vah určuje preferenci a sestavuje užitkovou funkci. Další funkcí metody MAUT je přidělení numerických hodnot jinak neporovnatelným atributům [5].

Postup při sestavování hodnotícího nástroje lze shrnout do následujících kroků [5, 6].

1. Definice dostupných alternativ – sestavení množiny možných řešení.
2. Definice kritérií (atributů) relevantních pro úlohu rozhodování.
3. Zhodnocení každého atributu pro každou alternativu.
4. Normalizace dat – každá hodnota z předchozího kroku musí být normalizována do intervalu $<0;1>$.
5. Stanovení užitkové funkce – hodnoty atributů mohou být vyjádřeny funkcí. Z normalizace v základu vyplývá lineární užitková funkce, lze ji však upravit např. exponenciální nebo goniometrickou funkcí.
6. Přidělení vah – stanovení koeficientu pro určení významnosti atributů. V tomto kroku lze využít několik metod přidělení vah, například:
 - Hrubé párové porovnání [7]
 - Saatyho metoda [8]
 - Metoda významnosti kritérií [7]
 - Metoda entropie [9]
7. Agregace vah a zhodnocení – vynásobením normalizovaných hodnot vahami a následným součtem je zjištěno výsledné ohodnocení alternativ.
8. Sestavení žebříčku alternativ na základě bodového ohodnocení.
9. Citlivostní analýza – kontrola správného nastavení atributů a vah, případné provedení úprav.
10. Výsledné doporučení.

3.2. Vstupní parametry

Na vstupu rozhodovacího nástroje je momentálně definováno následujících 9 parametrů. Autor předpokládá, že do parametry budou ještě upravovány v rámci harmonizace nástroje:

Tab. 2 Vstupní parametry a důvod jejich zařazení

Parametr	Důvod zařazení
Min. užitková délka koleje [m]	Výpočet nákladů a technologické hledisko
Délka nástupní hrany [m]	Výpočet nákladů a docházkových vzdáleností
Traťová rychlost [km/h]	Výpočet nákladů a posouzení dopravní technologie, např. zařazení VZPK
Saturace hran	Přidělení vah docházkovým vzdálenostem na základě pravidelnosti obsazování hran
Minimální počet hran	Vyloučení konfigurací s menším počtem hran
Tok cestujících	Přidělení vah docházkovým vzdálenostem na základě převažujícího nástupu a výstupu nebo přestupu
Přiléhající přejezd	Odečtení nákladů na přechod a související zařízení v případě, že je přístup zajištěn přes přejezd
Křížování	Posouzení dopravní technologie na základě pravidelnosti křížování
Průjezdnost kolejí	Vyloučení konfigurací, které v základu neumožňují plnou průjezdnost všech kolejí

3.3. Stanovení optimalizačních kritérií

Pro účely posuzování katalogových případů pro různé vstupní podmínky je stanoveno celkem 5 kritérií (též atributů), které jsou následně použity.

Kritérium *Investiční náklady* vychází z Oborového třídníku stavebních konstrukcí a prací (OTSKP) [10] v cenové úrovni k roku 2025. Do kalkulace byly zahrnuty položky související s konstrukcí koleje, výhybek, nástupišť (samostatná kalkulace hran a ploch), přístupových tras včetně přechodů a v případě, že jsou tyto položky uplatněny, je rovněž uvažováno s dynamickým zarážděním a výstražným zařízením přechodu koleje.

Kritérium *Docházkové vzdálenosti* je bylo zjištěno modelací všech řešených variant v programu AutoCAD a následně odměřením. Toto kritérium zohledňuje jak přestupní vazby směrem ven, tak přístupovou cestu do stanice z jejího okolí. Tyto hodnoty jsou následně poměrem váženy v závislosti na vstupních parametrech *Saturace hran a Tok cestujících*.

Zbývající kritéria *Bezpečnost, Dopravně-technologický dopad a Uživatelský komfort* jsou momentálně rozpracována. Bezpečnostní kritérium bude stanoveno na základě analýzy rizik posuzující četnost a závažnost definovaných incidentů a pravděpodobnost jejich výskytu. Dopravně-technologické kritérium bude vycházet z kalkulace časové ztráty závislé na provozních omezeních a intervalech postupných vjezdů a odjezdů. Kritérium uživatelského komfortu bude vycházet z připravovaného dotazníku zaměřeného na uživatelskou přívětivost různých užitých prvků.

3.4. Sestavení hodnotícího nástroje

Při sestavování multikritériálního hodnocení byl respektován postup uvedený v kapitole 3.1.

Množinou dostupných alternativ je katalog typových řešení, atributy jsou zvolena optimalizační kritéria. Je sestaveno zhodnocení všech atributů pro každou alternativu a následně provedena normalizace dat dle lineární užitkové funkce (může být ještě přehodnoceno).

Váhy jsou přiděleny v současném nastavení Saatyho metodou, tj. je porovnán vzájemný vztah mezi každou dvojicí parametrů a určen rozdíl ve významnosti kritérií. Přidělování vah Saatyho metodou vykazuje nízkou míru citlivosti a dochází k nedostatečné vyváženosti mezi jednotlivými atributy, což vychází z výpočtu vah geometrickým průměrem. Z těchto důvodů autor zvažuje jiné řešení pro přidělení vah, v úvahu přichází například entropická metoda. Případně lze oba tyto přístupy sledovat paralelně a výsledné hodnocení pak může být jejich kombinací [9, 11].

Následně je provedena agregace vah a zhodnocení alternativ pořadím, viz ukázka v následující kapitole. Citlivostní analýze se bude autor věnovat po dopracování optimalizačních kritérií.

3.5. Ukázka aplikace nástroje

V níže uvedené je prezentován výstup hodnotícího nástroje v současné podobě.

Tab. 3 Ukázka výstupu hodnotícího nástroje

Kritérium	BODOVÁNÍ					DISJUNKCE			VÝSLEDEK	POŘADÍ	
	Investiční náklady	Docházkové vzdálenosti	Bezpečnost	Dopravně-technologický dopad	Uživatelský komfort	BODOVÁ PENALIZACE	Min. poč. hran	Křížování			Průjezdnost
Váha	0,10	0,42	0,26	0,06	0,16						
1.1	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0,005	2
1.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0,000	1
1.3	0,00	0,15	0,25	0,00	0,00	0,13	1	1	1	0,130	4
2S.1	0,17	0,21	0,00	0,50	0,00	0,13	1	1	1	0,134	5
2S.2	0,21	0,36	0,25	0,50	0,00	0,27	1	1	1	0,269	10
2S.3	0,64	0,21	0,00	0,50	0,00	0,18	1	1	1	0,180	7
2P.1	0,26	0,04	0,50	0,00	0,00	0,17	1	1	1	0,174	6
2P.2	0,07	0,02	0,25	0,00	0,00	0,08	1	1	1	0,083	3
2P.3	0,09	0,15	0,50	0,00	0,00	0,20	1	1	1	0,205	8
3S.1	0,95	1,00	0,25	1,00	0,00	0,64	1	1	1	0,637	22
3S.2	0,90	0,23	0,25	1,00	0,00	0,31	1	1	1	0,310	11
3S.3	0,88	0,40	0,50	1,00	0,00	0,45	1	1	1	0,448	20
3S.4	0,90	0,29	0,50	0,50	0,00	0,37	1	1	1	0,370	14
3S.5	0,64	0,23	0,25	0,50	0,00	0,25	1	1	1	0,254	9
3S.6	0,77	0,44	0,50	0,50	0,00	0,42	1	1	1	0,422	18
3S.7	0,62	0,32	0,50	0,50	0,00	0,36	1	1	1	0,356	13
3S.8	0,71	0,43	0,75	0,50	0,00	0,48	1	1	1	0,478	21
3P.1	1,00	0,13	1,00	0,00	0,00	0,42	1	1	1	0,417	17
3P.2	0,82	0,12	0,75	0,00	0,00	0,33	1	1	1	0,329	12
3P.3	0,98	0,18	1,00	0,00	0,00	0,43	1	1	1	0,432	19
3P.4	0,81	0,15	1,00	0,00	0,00	0,40	1	1	1	0,403	16
3P.5	0,57	0,29	0,75	0,00	0,00	0,38	1	1	1	0,376	15

Zatímco u parametrů *Investiční náklady* a *Docházkové vzdálenosti* je z dat zřejmá vyšší úroveň zpracování, u parametrů *Bezpečnost* a *Dopravně-technologický dopad* jsou data nastavena provizorně a budou dále upřesněna. Parametr *Uživatelský komfort* není zpracován, z toho důvodu jsou v tabulce uvedeny nulové hodnoty.

4. Závěr

Problematiku navrhování železničních stanic lze považovat za aktuální, což potvrzuje i připravovaná novelizace normy ČSN 73 4959, která tuto oblast upravuje. Nadále dochází k vývoji a objevují se inovativní postupy, které se autor ve své práci bude snažit reflektovat.

V další fázi budou dopracována optimalizační kritéria, proběhne pravděpodobně úprava přidělování vah kritériím a bude provedena valorizace a harmonizace výstupů nástroje. Pro tyto účely bude využita mimo jiné diskuse s odbornou veřejností, která již částečně probíhá, a také se autor pokusí zapracovat praktické zkušenosti z již realizovaných stanic odpovídajících řešenému okruhu.

V závěru prací autor předpokládá vytvoření jednoduché aplikace, která zajistí vyšší přívětivost a využitelnost nástroje i pro široký okruh uživatelů.

Literatura

- [1] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN 73 4959, Nástupiště a nástupištní přístřešky na drahách celostátních, regionálních a vlečkách. 2009.
- [2] KOCHENDERFER, Mykel J.; WHEELER, Tim A. a WRAY, Kyle H. Algorithms for decision making. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, [2022]. ISBN 978-026-2047-012.
- [3] KOCHENDERFER, Mykel J. a WHEELER, Tim A. Algorithms for Optimization. The MIT Press, 2019. ISBN Algorithms for Optimization.
- [4] Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia. 2023, vol. 3, s. 77-87.
- [5] PATEL, Vraj. Introduction of MAUT and MCDA. Online. Medium.com. 2023. Dostupné z: <https://medium.com/@vrajpatel9988/introduction-of-maut-and-mcda-9802b547506c>. [cit. 2025-09-01].
- [6] JANSEN, Sylvia J. T. The Multi-attribute Utility Method. Online. In: . S. 101-125. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-90-481-8894-9_5. [cit. 2025-09-01].
- [7] Vícekriteriální hodnocení protipovodňových opatření. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [8] SAATY, Thomas L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. Aestim. 1994, roč. 24, s. 75-105.
- [9] ZHU, Yuxin; TIAN, Dazuo a YAN, Feng. Effectiveness of Entropy Weight Method in Decision-Making. Online. Mathematical Problems in Engineering. 2020. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/3564835>. [cit. 2025-09-01].
- [10] STÁTNÍ FOND DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY. Oborový třídník stavebních konstrukcí a prací (OTSKP). Online. Sfdi.gov.cz. 2025. Dostupné z: <https://sfdi.gov.cz/cenove-databaze/otskp/>. [cit. 2025-09-01].
- [11] SHANMUGAPRYIA, P.; SELVAKUMARI, K. a KAVITHA, S. Entropy Method of Multi-Attribute Decision-Making Problems. Online. ES3 Web of Conferences. 2024, č. 491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449102001>. [cit. 2025-09-01].

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován za podpory studentského grantu SGS25/097/OHK2/2T/16.

Porovnání metod pro hodnocení kvality geometrie koleje

Ing. Erik Dušek¹

*Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební, VUT v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno*

e-mail_1: erik.dusek@vut.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá porovnáním veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje na základě dat měřícího vozu. Ke zkoumaným veličinám patří směrodatná odchylka (SD), index kvality koleje (TQI), fraktální dimenze (FD) a lokální závady (ID). Pro posouzení jejich vhodnosti pro hodnocení kvality geometrie koleje byly vytvořeny grafy průběhu po délce i vývoje v čase.

Klíčová slova

Geometrie koleje, měřící vůz, směrodatná odchylka, index kvality koleje, fraktální dimenze, lokální závady.

Comparison of methods for track geometry quality evaluation

Abstract

The paper deals with the comparison of variables for track geometry quality evaluation based on data from a measuring car. The variables examined include standard deviation (SD), track quality index (TQI), fractal dimension (FD), and local defects (ID). To assess their suitability for track geometry quality evaluation, graphs of their progress along the length and variation over time were created.

Keywords

Track geometry, measuring car, standard deviation, track quality index, fractal dimension, local defects.

1. Úvod

Pravidelná měření geometrických parametrů koleje (GPK) představují klíčový podklad pro plánování údržby a obnovy. Údržbové zásahy jsou ekonomicky i technicky náročné, navíc negativně ovlivňují plynulost a spolehlivost železniční dopravy, proto je nutné je optimálně časovat. Příliš brzký zásah znamená zbytečné náklady. Naopak pozdní zásah vede k vyššímu opotřebení svršku i spodku a může ohrozit bezpečnost provozu. V praxi se proto stále více prosazuje prediktivní přístup k plánování údržby založený na analýze dlouhodobých časových řad měření, který umožňuje sledovat rychlost degradace a předvídat okamžik, kdy dojde k překročení mezní hladiny.

1. Současný stav poznání

Degradace představuje postupný pokles schopnosti systému plnit svůj účel, projevující se jako viditelné poškození způsobené fyzikálními procesy, které sice nejsou vidět, ale můžeme je sledovat pomocí indexů kvality [1]. Degradace začíná postupně vlivem nedokonalostí materiálu, chyb v návrhu, při výrobě a během výstavby, doplněných o vliv prostředí a podloží [1][2]. Každý úsek má jedinečný proces degradace podle kombinace působících faktorů. Kvůli neměřitelným interakcím mezi faktory je rychlost degradace považována za náhodnou [2].

Kvalita koleje se snižuje vlivem dynamického zatížení od projíždějících vozidel [4], nejvíce u nerovností o vlnové délce kolem 1 metru. Podbíjení je účinné pouze u nerovností od 3 metrů, kratší vyžadují broušení kolejnic [3]. Čerstvě podbitá kolej rychle sedá a poté se sedání zpomalí [3, 5, 6]. Nerovnoměrné sedání vytváří poruchy s negativním dopadem na kvalitu svršku, vozidla a komfort cestujících [7].

Pro udržení železniční infrastruktury v uspokojivém stavu je nezbytné pochopit způsob změn stavu jednotlivých prvků a vytvořit degradační model pro předvídaní jejich budoucího chování [6].

Je třeba vytvořit flexibilní databázovou strukturu obsahující informace o prvcích infrastruktury (instalace, zatížení, rychlost) i měřené veličiny (geometrické parametry, profily, vady) s podporou prostorových i lineárních souřadnic a možností generování geografického informačního systému [6].

Systém musí umožňovat dva typy analýz: podrobné zkoumání kratších úseků specializovanými pracovníky a automatickou analýzu velkého množství homogenních segmentů s možností specifikace parametrů pro předpovídání chování [6].

1.1. Směrodatná odchylka (SD)

Směrodatná odchylka je jeden z nejčastěji používaných indexů kvality v Evropě i ve světě. Vyjadřuje míru rozptýlení signálu na určité délce koleje kolem střední hodnoty. SD souvisí s energií signálu v daném rozsahu vlnových délek [8].

Dle českého předpisu [9] se SD počítá dle vztahu:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

kde n je počet vzorků měření,
 x_i je odchylka od střednice geometrické veličiny.

1.2. Index kvality koleje (TQI)

Je založený na měření tzv. **Délky prostorové křivky** (hodnoceného signálu), která závisí na počtu a velikosti odchylek, které se vyskytnou v segmentu koleje zvolené délky.

Index kvality koleje vybraného parametru se spočítá dle vztahu [10]:

$$TQI_i = \left(\frac{L_s}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (2)$$

kde L_s je délka prostorové křivky,

L_0 je délka segmentu koleje (délka signálu bez závad).

Délka prostorové křivky se spočítá pomocí Pythagorovy věty [10]:

$$L_s = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad (3)$$

kde Δx_i je vzdálenost mezi měřeními,

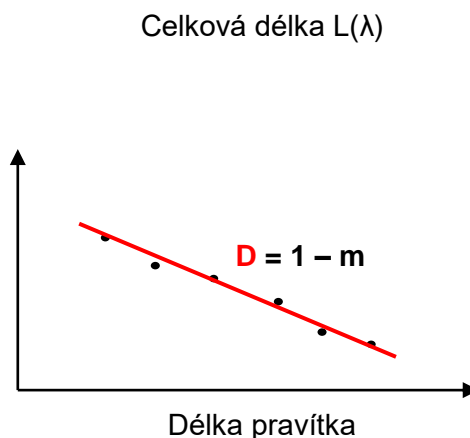
Δy_i je rozdíl naměřených hodnot,

n je počet měření na segmentu koleje.

Indexy kvality jednotlivých parametrů lze zkombinovat do jednoho „manažerského“ indexu kvality za pomocí aritmetického průměru a normalizace signálu pomocí mezních odchylek pro lokální závady [11].

1.3. Fraktální dimenze (FD)

Fraktální dimenze je matematický nástroj, který popisuje složitost a „drsnost“ signálu v různých měřítkách. Umožňuje hodnotit nepravidelnosti, které klasické statistické ukazatele nedokážou plně vystihnout. Existuje více způsobů, jak FD vypočítat, ale v hodnocení geometrie koleje se nejčastěji používá obvodová metoda. Ta vychází z principu měření délky křivky při různém rozlišení. Na signál se postupně „pokládá pravítko“ určité délky a zjišťuje se, jaká je celková délka křivky při tomto rozlišení. Platí, že čím kratší pravítko použijeme, tím detailněji křivku sledujeme a tím větší délku získáme. Získané hodnoty se vynášejí do logaritmického Richardsonova grafu, kde se proloží regresní přímka, jejíž směrnice určuje hodnotu fraktální dimenze [12].



Obr. 1 Richardsonův graf.

Vyšší FD znamená složitější a členitější průběh signálu. V praxi se obvykle používá zjednodušená obvodová metoda [14], která má výrazně jednodušší, a tudíž i rychlejší výpočet, přičemž poskytuje podobně přesné výsledky.

1.4. Lokální závady (ID)

Lokální závady jsou reprezentované amplitudou od nuly po hodnotu špičky [15]. Velké lokální závady mohou způsobit vykolejení vlaku. Pro účely hodnocení kvality geometrie koleje se počítají odchylky, které překračují vybranou mezní hladinu např. mez zásahu na zvolené délce koleje. Jednotlivé odchylky musí mít minimální délku 0,25 či 1 m (s ohledem na krok měření), aby se jejich vliv projevil. Provozní odchylky pro kontrolu lokálních závad udávají normy [16], [8].

2. Použité metody a postupy

Veškerá data z měřicího vozu byla získána z Centra techniky a diagnostiky (CTD) Správy železnic a převedena do formátu CSV s jednotlivými měřeními. Pro lepší přehlednost a výkon byla data načtena do tabulek s pojmenovanými sloupci podle názvů parametrů a následně uložena do bitových souborů s příponou MAT, což eliminuje nutnost načítání z více různých souborů při každém hodnocení. Veškeré zpracování a vyhodnocení dat bylo provedeno v programu MATLAB.

Indexy kvality geometrie koleje lze počítat dvěma způsoby – diskrétně nebo klouzavě. Diskrétní metoda počítá hodnotu indexu pro každý pevně vymezený segment a je vhodná zejména pro plánování údržby [11]. Klouzavá metoda počítá index v každém bodě s využitím posuvného okna a poskytuje detailnější obraz průběhu kvality po délce.

Klíčovým parametrem je délka segmentu, která se obvykle volí 100 nebo 200 m (někdy až 1 km) [11]. Kratší segmenty lépe vystihují lokální závady, zatímco delší poskytují přehlednější obraz o celkovém stavu. Při sledování změn v čase je nezbytné používat konzistentní metodu i délku segmentu.

2.1. Hodnocené geometrické parametry koleje

Rozchod koleje (RK) je nejmenší vzdálenost mezi kolejnicemi měřená v rozsahu 0 až 14 mm pod spojnicí temen kolejnicových pásů.

Převýšení koleje (PK) je výškový rozdíl temen kolejnicových pásů.

Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu (VL, VP) se měří jako svislá odchylka temene kolejnice od vyhlazené referenční linie vyjádřená v definovaných vlnových délkách [15].

Podélná výška koleje v ose (VK) se spočítá jako průměr podélné výšky obou kolejnicových pásů VL a VP [15].

Směr levého a pravého kolejnicového pásu (SL, SP) se měří jako vodorovná odchylka pojížděné hrany kolejnice od vyhlazené referenční linie vyjádřená v definovaných vlnových délkách [15].

Směr koleje v geometrické ose (SK) se spočítá jako průměr směru obou kolejnicových pásů SL a SP [15].

2.2. Pásmo vlnových délek ve skutečné geometrii

Při hodnocení geometrických parametrů koleje se naměřený signál filtruje do určených vlnových pásem, čímž se odfiltrují odchylky s menším vlivem na průjezd vozidel, jako např. mikrogeometrie kolejnic nebo směrové a výškové oblouky [16].

- D1: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$ (pro všechny rychlosti)
- D2: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$ (pro rychlosti od 120 po 300 km/h)

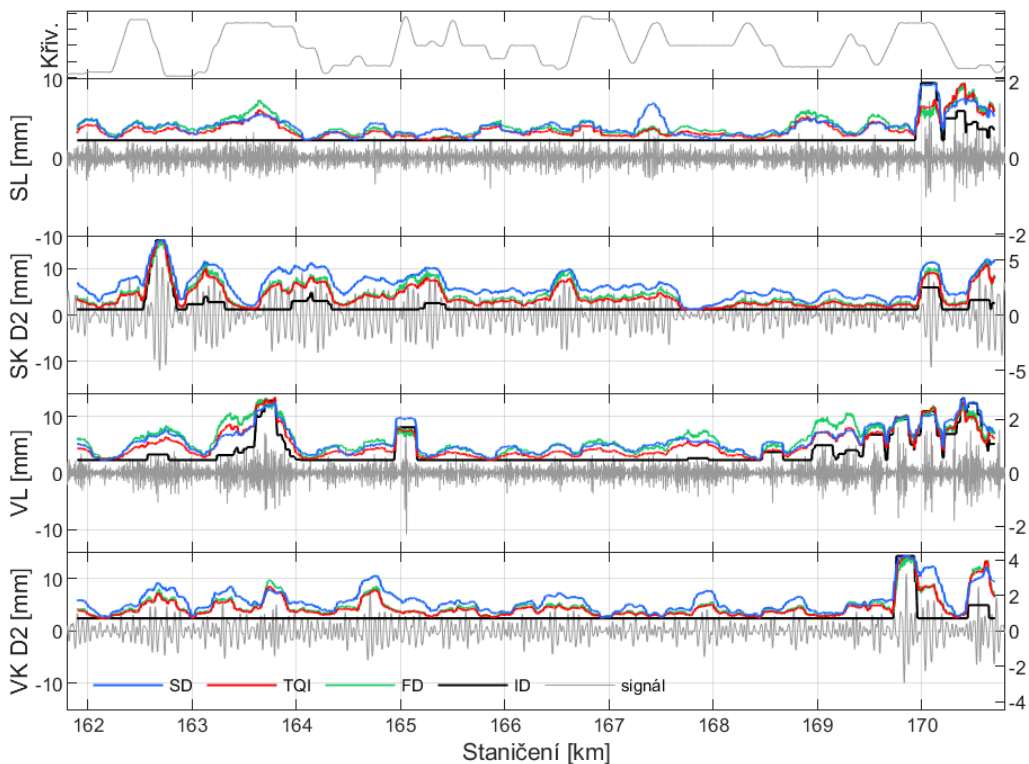
3. Přehled a zpracování výsledků

V této kapitole jsou prezentovány a analyzovány výsledky hodnocení kvality geometrie koleje na vybraných sledovaných úsecích:

- Hodonín – Rohatec – koridorová trať, přímý úsek
- Brno – Blansko – koridorová trať, malé poloměry

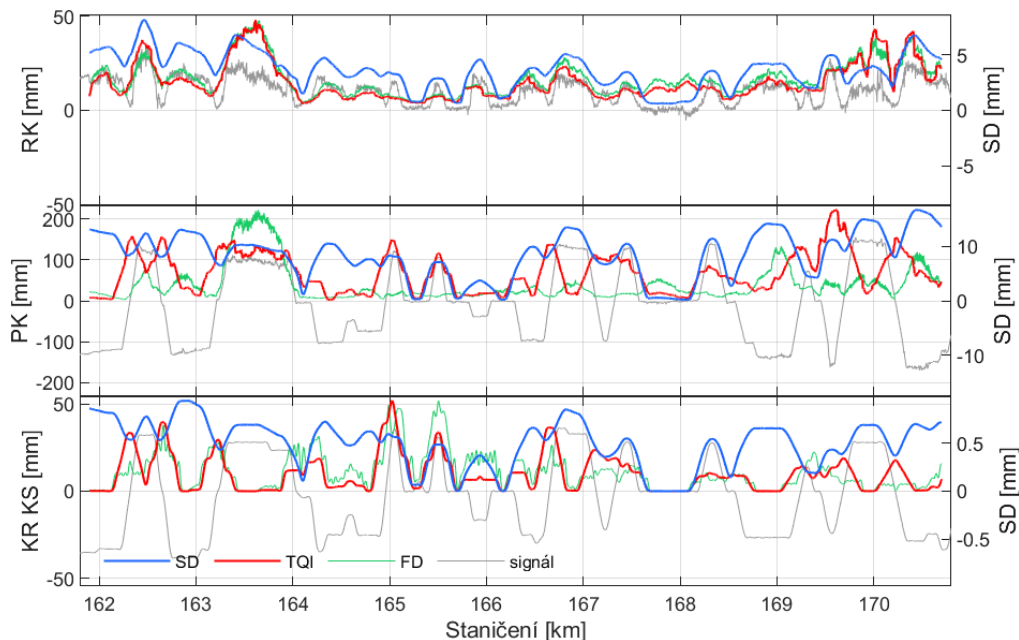
3.1. Průběh veličin po délce koleje

Aby bylo možné porovnávat průběh veličin po délce koleje byly jejich hodnoty přeškálovány do shodného rozsahu. Všechny prezentované grafy byly vytvořeny pomocí klouzavé metody s délkou segmentu 200 m.



Obr. 2 Průběh veličin po délce, SK a VK, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020.

Na Obr. 2 jsou vyobrazeny průběhy parametrů směru a výšky koleje ve vlnových pásmech D1 a D2. FD (zelená) vykazuje podobný průběh jako TQI (červená), zejména u VK D2, s mírnými oscilacemi. TQI má shodný tvar s SD (modrá), ale odlišné hodnoty. Od km 169 se objevuje série závady VL v 250metrových intervalech. Lokální závady (černá) se projevují pouze v nejproblematičtějších místech, zatímco jinde dosahují nulových hodnot, což značí dobrý stav tratě a včasnou údržbu.



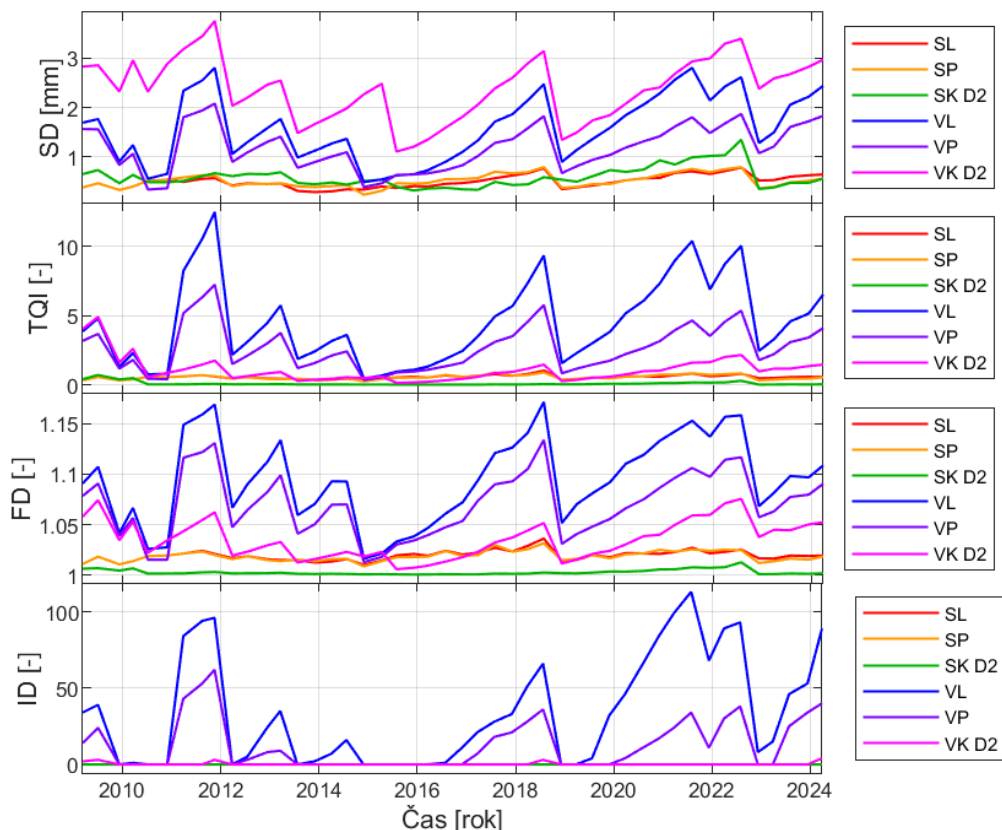
Obr. 3 Průběh veličin po délce, RK a PK, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020.

Na Obr. 3 jsou vyneseny průběhy veličin u nefiltrovaných parametrů. Každá veličina reaguje na celkový signál odlišně, přičemž SD vykazuje nejhladší průběh a nejvíce připomíná zdrojový signál v absolutní hodnotě. Pro PK a KR KS nejsou definované mezní hladiny pro lokální závady, a proto nejsou v grafech vyneseny lokální závady.

Z grafu PK je zřejmé, že TQI dosahuje nejvyšších hodnot ve vstoupnicích a nejnižších v kružnicových částech oblouků, zatímco FD reaguje opačně. Graf KR KS ukazuje, že FD na rozdíl od TQI více reaguje na vyšší drsnost než na délku signálu.

3.2. Vývoj kvality v čase

Pro lepší pochopení vývoje jednotlivých veličin byly vytvořeny také grafy vývoje v čase, z nichž je patrné cyklické chování (degradace a opravy) kvality jednotlivých parametrů.



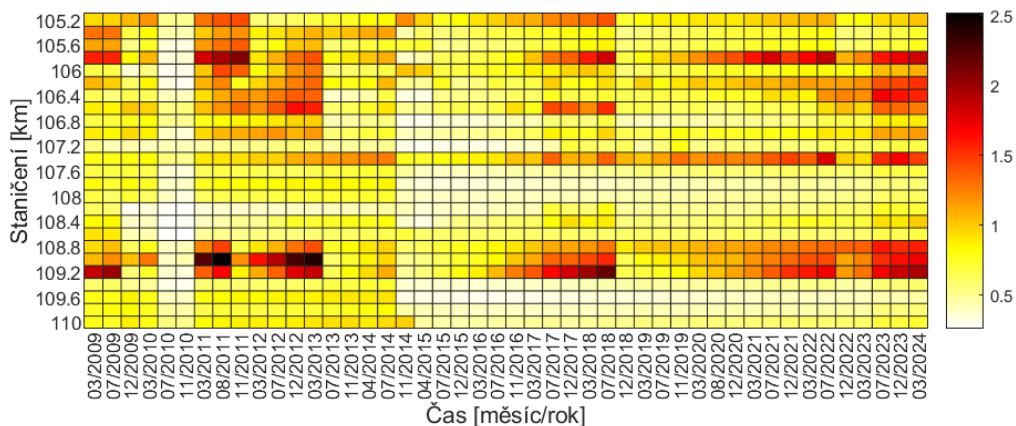
Obr. 4 Vývoj veličin v čase, Hodonín – Rohatec, K1, km 105,8 – 106,0.

Na Obr. 4 je znázorněn typický vývoj veličin v přímém úseku s výrazným cyklickým chováním (pilovým průběhem) u výšky koleje i směru koleje, přičemž směr dosahuje výrazně nižších hodnot, jelikož data pochází z přímého úseku. SD vykazuje v pásmu D2 znatelně vyšší hodnoty než TQI a FD, což je způsobeno reakcí na vyšší amplitudu signálu oproti měření jeho délky a drsnosti u ostatních veličin. U všech parametrů je patrný výrazný pokles v roce 2010 způsobený odstraněním chybných dat při importu.

Lokální závady vykazují překvapivě podobný vývoj jako ostatní veličiny u VL a VP se zachováním cyklického chování, ačkoliv nejsou pro sledování časového vývoje principiálně vhodné. U ostatních parametrů se lokální závady téměř nevyskytují, což znemožňuje sledování vývoje kvality.

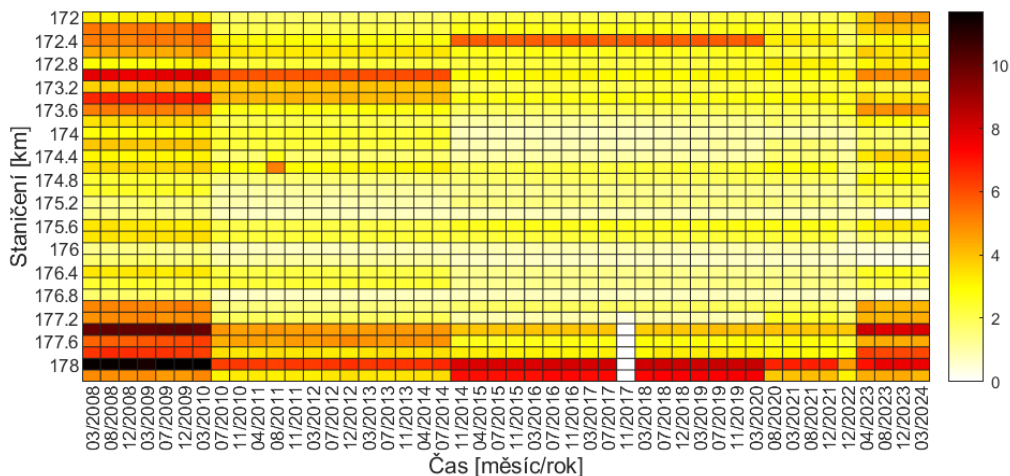
3.3. Vývoj kvality po délce i v čase

Pro získání komplexního přehledu o vývoji kvality geometrie koleje ve sledovaných úsecích, byly vytvořeny tzv. teplotní mapy, kde tmavší barva znamená vyšší SD a světlejší barva nižší SD. Na vodorovné ose je datum měření a na svislé počáteční staničení segmentů.



Obr. 5 Vývoj SD po délce i v čase, VP, Hodonín – Rohatec, K1.

Na Obr. 5 je vyobrazena teplotní mapa vývoje SD, která umožňuje identifikovat pravděpodobná podbití v letech 2009, 2011, 2013, 2014, 2018 a 2022. Z grafu je patrné, že segmenty s nižší kvalitou degradují rychleji (km 105,8; 107,4 a 109), zatímco u kvalitnějších segmentů zůstává SD v čase relativně stabilní (např. km 107,2; 108,2 a 109,6).



Obr. 6 Vývoj SD po délce i v čase, SK D2, Adamov – Blansko, K1.

Z Obr. 6 je patrné, že hodnoty SK D2 vykazují v čase relativně stabilní průběh na rozdíl od parametrů VL a VP. Teplotní mapa identifikuje pravděpodobné údržbové zásahy v letech 2010, 2014, 2020 a 2022, kdy byla dokončena celková obnova úseku. Je zajímavé, že kvalita se může po podbití i zhoršit např. v km 172,4 a 177,6, stejně jako skokové zhoršení v km 174,6 při jediném měření v létě 2011.

V grafu je zřetelná změna zbarvení v roce 2010 do kterého probíhalo měření SK a VK ve vlnovém pásmu 1 až 70 metrů. Podobná změna proběhla i v roce 2023, kdy došlo ke zvýšení amplitudy signálu vlivem změny filtrace v novém měřícím voze. V listopadu 2017 nebyla změřena část úseku od kilometru 177,2, kvůli snížení rychlosti před vjezdem do stanice, což vyústilo v nulové hodnoty SD ve vlnovém pásmu D2, které se měří inerciálními snímači, které při nízké rychlosti nepracují.

4. Diskuse

SD má nejhladší průběh a dobře kopíruje tvar hodnoceného signálu. TQI vykazuje vyšší citlivost na lokální závady ale i na výpadky měření, zatímco FD projevuje značnou oscilaci závislou na vlnové délce. S ohledem na silnou korelaci s FD se jako lepší veličina jeví TQI. Lokální závady umožňují hodnocení pouze v problematických úsecích a hodí se především pro identifikaci izolovaných poruch.

Pro smysluplné hodnocení rozchodu a převýšení pomocí SD by bylo třeba filtrování do vlnových pásem D1 a D2. FD lze využít i pro celkové parametry, protože měří pouze drsnost signálu bez vlivu amplitudy či délky.

Ve všech úsecích se projevuje cyklické chování kvality VK charakterizované střídáním postupné degradace a skokových zlepšení vlivem podbití. Kvalita SK v přímých úsecích zůstává relativně stabilní, zejména ve vlnovém pásmu D2.

Lineární regrese mezi podbitími umožňuje sledování rychlosti degradace, avšak vyžaduje jednotnou databázi s informacemi o provozním zatížení a historií údržby.

5. Závěr

Analýza kvality vybraných traťových úseků potvrdila souvislosti mezi GPK a hodnocenými veličinami. Výsledky ukázaly, že segmenty s nižší počáteční kvalitou degradují rychleji než kvalitnější úseky, přičemž rozhodující vliv má kvalita železničního spodku.

Pro hodnocení kvality koleje se jako nejvhodnější ukazuje směrodatná odchylka vzhledem k nejplynulejšímu vývoji v čase a současně věrnému reflektování průběhu signálu. Alternativně lze využít TQI, který je však citlivější na lokální odchylky a výpadky měření.

Pro efektivní plánování údržby je nezbytné dlouhodobé sledování vývoje kvality geometrie koleje prostřednictvím jednotné databáze naměřených dat a historie údržby. Lineární regrese umožňuje odhad časů překročení mezních hladin a následné plánování údržbových zásahů.

Literatura

- [1] SÁNCHEZ-SILVA, Mauricio a Georgia-Ann KLUTKE. Reliability and life-cycle analysis of deteriorating systems. Cham: Springer, 2016, 355 stran : grafy. ISBN 978-3-319-20945-6.
- [2] XU, Peng, Reng-Kui LIU, Feng WANG, Fu-Tian WANG a Quan-Xin SUN. Track Deterioration Characteristics Based Track Measurement Data Mining. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. 2013 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2013/970573>
- [3] ESVELD, Coenraad. Modern railway track. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, c2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [4] GULER, Hakan. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. *Građevinar* [online]. 2016, 68(12), 979-993 [cit. 2025-01-13]. Dostupné z: doi:10.14256/JCE.1458.2015
- [5] PELTOKANGAS, Ossi. Evolution of railway track settlement after ballast tamping: International Workshop Ballast: Issues & Challenges. Paris, 2013.
- [6] JOVANOVIĆ, Stanislav, Hakan GULER a Boško ČOKO. Track degradation analysis in the scope of railway. *Građevinar* [online]. 2015, 67(3), 247-257 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: doi:10.14256/JCE.1194.2014
- [7] BERGHOLD, Armin. Track Service Life Driven by Ballast Quality: International Workshop Ballast: Issues & Challenges. Paris, 2013.
- [8] ČSN EN 13848-6+A1. Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 6: Stanovení kvality geometrie koleje. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [9] PŘEDPIS SŽ S2/4. Zajišťování diagnostiky železničního svršku a spodku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem. Praha: Správa železnic, státní organizace, 2025.
- [10] EL-SIBAIE, Magdy a Yu-Jiang ZHANG. Objective Track Quality Indices. *Transportation Research Record* [online]. 2004, 1863(1), 81-87 [cit. 2025-01-20]. Dostupné z: doi:10.3141/1863-11
- [11] OFFENBACHER, Stefan, Johannes NEUHOLD, Peter VEIT a Matthias LANDGRAF. Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI. *Monitoring and Maintenance Systems for Railway Infrastructure* [online]. 2020, 16 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10238490>
- [12] HYSLIP, James P. Fractal Analysis of Track Geometry Data. *Transportation Research Record*. 2002, (1785), 50-57.
- [13] LANDGRAF, M. a F. HANSMANN. Fractal analysis as an innovative approach for evaluating the condition of railway tracks: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. In: *Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2019, s. 596-605 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954409718795763>

- [14] NEJEZCHLEBOVÁ, Jitka. Fraktální analýza geometrických parametrů koleje. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.
- [15] ČSN EN 13848-1. Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 1: Popis geometrie koleje. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [16] ČSN 73 6360-2. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Richardu Svobodovi, Ph.D., a kolegům z Ústavu železničních konstrukcí a staveb.

Městská protihluková clona u tramvajové trati

Ing. Petra Váňová¹, Ing. Lenka Lomoz²

Fakulta stavební ČVUT v Praze

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

e-mail_1: petra.vanova@fsv.cvut.cz,

e-mail_2: lenka.lomoz@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Článek se zabývá souhrnem poznatků o aplikaci městské protihlukové clony umístěné u vybraných úseků tramvajové trati v Praze, získaných jejím dlouhodobým sledováním a ověřováním. Zaměřuje se na její popis, umístění a dosažený útlum hluku v městském prostředí, kde běžná protihluková opatření nelze efektivně využít. Součástí prezentovaných poznatků je také provedení test požární odolnosti a cvičný zásah složek IZS, při kterém byl nacvičen postup vyproštění osoby uvízlé v prostoru kolejíště.

Klíčová slova

Městská protihluková clona, tramvajová trať, akustický útlum, požární odolnost.

Municipal noise absorbing screen along a tram line

Abstract

This paper summarizes the findings from the long-term monitoring and verification of a municipal noise absorbing screen installed along selected sections of a tram line in Prague. It outlines the barrier's design, placement, and the achieved noise reduction in an urban environment, where conventional noise mitigation measures cannot be effectively applied. The presented results further include a fire resistance test as well as a training exercise conducted by the Integrated Rescue System, which focused on practicing the procedure for rescuing a person trapped within the track area.

Keywords

Municipal noise absorbing screen, tram line, noise reduction, fire resistance, extrication of a person.

1. Úvod

Rostoucí nároky na kvalitu života a zdraví obyvatel vedou ke zpříšňování environmentálních požadavků, zejména v obydlených oblastech. Mezi sledované faktory patří i hluk, jehož limity jsou postupně snižovány. V městském prostředí, které je závislé na fungující dopravní infrastruktuře, vzniká hluk nejen ze silniční, ale také z kolejové dopravy [1].

Tramvajová doprava je z ekologického i urbanistického hlediska považována za velmi vhodnou formu městské mobility. Při vyšší intenzitě provozu však může docházet k překračování přípustných hladin hluku. Aktivní opatření, jako je údržba tratí a vozidel, mají své limity, a proto je nutné využívat i opatření pasivní [2].

V Praze již byly instalovány dva zkušební úseky městské protihlukové clony, která představuje nízký prvek pasivní ochrany. Díky umístění přímo u zdroje hluku – v místě kontaktu kola s kolejnicí – účinně snižuje hlukovou zátěž, aniž by narušovala výhled nebo městský ráz. Clona je vyrobena z kompozitu na bázi recyklovaného gumového granulátu pojeného polyuretanem, což přináší výhodu jak z hlediska akustického účinku, tak i udržitelnosti [3].

Použití je vhodné na tramvajových tratích vedených na samostatném tělese nebo mimo prostor pozemní komunikace, především u tratí s otevřeným svrškem či s travnatým zákrytem. Nejvyšší účinnosti clona dosahuje v přímých úsecích a ve směrových obloucích s poloměrem větším než 200 m, kde není nutné její vzdálení od kolejí [3].

V rámci ověřování městské protihlukové clony byla řešena i problematika požární bezpečnosti. Řešily se možné příčiny vzniku požáru při reálném umístění clony do tramvajové tratě, včetně provedení sérií zkoušek reakce na oheň, jejichž cílem bylo posoudit účinky plamene na prvek clony a vyhodnotit rozsah jeho poškození.

2. Městská protihluková clona

Městská protihluková clona (MPHC) – na rozdíl od jiných běžně užívaných protihlukových stěn – má ve variantě pro tramvajové tratě velmi malou výšku, jen 30 - 35 cm nad temenem kolejnice (TK). Využití městské protihlukové clony je pro její charakteristiky výhodné zejména u tramvajových tratí v zastavěných oblastech, kde použití konvenčních protihlukových opatření není z různých důvodů vhodné nebo vůbec možné. Zejména se jedná o začlenění protihlukových opatření do uličního prostoru, nenarušování pohledových vazeb. Z výše uvedeného vyplývá, že typickým místem, kde lze MPHC aplikovat, je tramvajová trať v širším centru nebo na okraji měst, vedená na samostatném tělese nebo zcela mimo prostor pozemní komunikace s konstrukcí s otevřeným kolejovým ložem nebo s travním zákrytem. Pro tyto tratě může aplikace MPHC představovat vhodnou variantu protihlukového opatření pro snížení hluku emitovaného z provozu do okolní zástavby [3].

Mezi výhody patří díky materiálovému a konstrukčnímu řešení (na rozdíl od jiných srovnatelných prvků například betonových) i možnost rychlého rozebrání v případě nutnosti zásahu IZS například u nehod, povalení osob a podobně.

Pro vhodnou aplikaci zkušebních úseků byly síti Dopravního podniku (DP) hl. města Praha vybrány dvě lokality. Jednalo se o aplikaci u tramvajové trati v Praze - Modřanech a Praha Hloubětín [3].

2.1. Městská protihluková clona – Praha Braník

V dubnu 2016 byl v rámci zkušebního projektu v pražské lokalitě Braník (ul. Modřanská) instalován 24metrový úsek městské protihlukové clony (MPHC). Tato pilotní aplikace byla realizována na samostatném tělese tramvajové trati, charakterizovaném otevřeným šterkovým ložem a prvky jako žlábkové kolejnice NT1 a betonové pražce TB93. Izolace od souběžné silniční dopravy v ulici Modřanská poskytla vhodné podmínky pro experimentální ověření účinnosti systému [6].

Konstrukční řešení MPHC vycházelo z modulárního principu, přičemž jednotlivé dílce měly kvádrový tvar s rozměry 600 x 250 x 750 mm (výška x šířka x délka). Tyto segmenty byly vyrobeny z granulátu SBR (Styrene-Butadiene Rubber) z recyklované pryže. Pro optimalizaci akustických vlastností byla strana přivrácená ke kolejišti konvexně tvarována, což je modifikace založená na zkušenostech z předchozího grantového projektu zaměřeného na multifunkční gabiony. Instalace dílců probíhala na zhutněnou základovou spáru ve vyhloubené rýze v kolejišti, přičemž kriticky důležité parametry, jako je vzdálenost líce clony od osy koleje (1420 mm) a výška nad temenem kolejnice (300 mm), byly kontinuálně monitorovány. Spojení jednotlivých dílců bylo zajištěno dřevěnými laťkami umístěnými v horní části, což zajistilo jejich celkovou stabilitu a odolnost vůči vnějším vlivům [6].

Následně po prvotních akustických měřeních byla implementována úprava za účelem zvýšení akustické účinnosti protihlukového opatření. Ta spočívala v adici desek z recyklované pryže o tloušťce 25 mm na horní hranu clony. Tato modifikace vedla k přesahu o délce 70 mm, což redukovalo vzdálenost líce clony od osy koleje na 1350 mm (Obr. 1). Zkušební provoz MPHC byl ukončen v listopadu 2019, kdy došlo k demontáži konstrukce v souvislosti s rekonstrukcí dotčené tramvajové trati. Součástí demontážních prací bylo i provedení zkušebního průchodu clony složkami IZS a Hasičským záchranným sborem Dopravního podniku hlavního města Prahy (viz kapitola 4).



Obr. 1 MPHC se stříškou v lokalitě Praha Braník.

2.2. Městská protihluková clona – Praha Nový Hloubětín

Na základě zkušeností z pilotního projektu MPHC v pražském Braníku byl návrh a instalace protihlukové clony optimalizován pro novou lokalitu v Praze – Novém Hloubětíně. Tato oblast byla vybrána vzhledem k masivní bytové výstavbě v blízkosti tramvajové trati, která je vedena na samostatném tělese, a to jak v přímém úseku, tak i v oblouku o poloměru 400 m. Konstrukce trati tvoří širokopatní kolejnice 49E1, betonové pražce B03 a štěrkové lože frakce 32/63. Celková délka instalované clony dosáhla 55 m [3].

Oproti předchozí variantě byla v Novém Hloubětíně použita inovovaná konstrukce s betonovým základovým pásem, který je vyztužen nevodivou kompozitní sklolaminátovou mříží, aby se eliminovalo šíření bludných proudů. Do základu byly integrovány ocelové trubky pro usazení jednotlivých dílců.

Samotné dílce clony byly tvořeny dvěma částmi, obě vyrobené z pojeného SBR granulátu. Spodní díl měl optimalizované rozměry (600 x 400 x 250 x 600 mm) a jeho povrch byl pro lepší akustickou absorpci upraven do tvaru vlny. Horní část s výškou 100 mm vytvářela přesah směrem ke koleji. Vnitřní část dílců byla odlehčena dřevěnou konstrukcí a polystyrenovou výplní. Mezi sousedními segmenty bylo navrženo zazubení, které minimalizuje prostup hluku. Vzdálenost clony od osy koleje byla 1450 mm ve spodní části a 1370 mm v horní části, přičemž výška nad temenem kolejnice činila 300 mm [3].



Obr. 2 Výstavba MPHC v lokalitě Praha Hloubětín.



Obr. 3 Výsledná aplikace MPHC v lokalitě Praha Hloubětín.

3. Měření hladin akustického tlaku

Pro ověření účinnosti městských protihlukových clon (MPHC) byly na obou zkušebních úsecích, v Praze Braník a v Novém Hloubětíně, provedeny

rozsáhlé měřicí kampaně. Tato měření probíhala v souladu s normou ČSN EN ISO 3095 a zaměřovala se na určení reálné účinnosti a akustické stálosti clony.

Měření akustického tlaku z tramvajového provozu bylo realizováno ve vzdálenosti 7,5 metru od osy koleje a ve výšce 1,2 metru nad temenem kolejnice. Vzhledem k prostorovým omezením byl v Braníku použit pouze jeden měřicí profil, ve kterém bylo postupně ve třech měřících kampaních měřena situace před výstavbou MPHC, po výstavbě MPHC a po aplikaci MPHC se stříškou.

Zaznamenávány byly časové průběhy ekvivalentních hladin akustického tlaku $L_{Aeq(1s)}$ s časovou konstantou F (Fast). Pro vyhodnocení jednotlivých průjezdů tramvají byla použita hladina zvukové expozice L_{AE} . Útlum hluku vlivem MPHC byl stanoven jako energetický rozdíl mezi průměrnými hladinami L_{AE} pro jednotlivé kategorie vozidel s clonou a bez ní. Naměřená kombinovaná nejistota měření byla stanovena na ± 2 dB.

Měření probíhala v úzké spolupráci s Dopravním podnikem hl. m. Prahy. Veškeré průjezdy byly prováděny konstantní rychlostí 50 km/h s povolenou odchylkou $\pm 5\%$.

Následující tabulka Tab. 1 uvádí hodnoty dosaženého útlumu s použitím MPHC a MPHC se stříškou v lokalitě Praha Braník.

Tab. 1 Dosažený útlum v lokalitě Praha Braník

Lokalita Praha Braník					
Typ tramvaje	Počty průjezdů			Rozdíl naměřených hodnot L_{AE} [dB]	
	bez MPHC	s MPHC	MPHC + stříška	bez MPHC/ s MPHC	Bez MPHC/ MPHC + stříška
2 x T3R.P	15	10	8	2,5	3,5
14 T	4	3	5	4,6	5,3
15 T	1	5	9	1,8	2,8
KT8D	11	9	11	3,5	4,1

Z tohoto přehledu je patrné, že nejlepších výsledných hodnot útlumu dosahují tramvaje typu KT8D5N. Tento výsledek je dobře vysvětlen tvarem skříně těchto vozidel, neboť na rozdíl od jiných typů tramvají (například tramvajové soupravy typu T3) mají skříně tramvaje typu KT8D5N již od své spodní části rovnou bočnici. Ve výšce 30 cm nad temenem kolejnice (této výšky dosahuje MPHC) je mezi skříní tramvaje a clonou menší mezera než u jiných typů. Tramvajová souprava typu 14T sice dosahuje útlumu až 5,3 dB, ale nebylo zachyceno potřebné množství průjezdů daného typu, aby se dalo hovořit o relevantním výsledku [6].

Během měření v úseku Praha Nový Hloubětín byl úsek pojížděn referenčním vozidlem T3SU. Díky tomu měření probíhala za shodných podmínek, stejný technický stav vozidla, stejná rychlost apod. Kromě referenčního vozu byly v obou lokalitách měřeny i průjezdy dalších typů tramvají, jako jsou 14T, 15T, T3R (2 vozy) a KT8D.

Následující tabulka Tab. 2 uvádí hodnoty dosaženého útlumu s použitím MPHC v lokalitě Praha Nový Hloubětín.

Tab. 2 Dosažený útlum v lokalitě Praha Hloubětín

Lokalita Praha Nový Hloubětín		
Typ tramvaje	Počty průjezdů	Rozdíl naměřených hodnot L_{AE} [dB]
		bez MPHC/ s MPHC
T3SU	13	3,4
KT8D	15	5,2
T3R (2vozy)	5	3,7
15T	7	4,5
14T	3	3,2

V obou lokalitách bylo dosaženo shodných výsledků při průjezdu nejen referenční tramvaje. Útlum se pohyboval u tramvajů typu T3SU a T3R v rozmezí 3 – 4 dB. U tramvajů typu 15T nebo KT8D byl útlum díky příznivému tvaru tramvajové skříně ve spodní části až 5 dB. U tramvajových souprav typu 14T nebylo zachyceno potřebné množství průjezdů daného typu, aby se dalo hovořit o relevantním výsledku [3].

3. Požární odolnost MPHC

V rámci ověřování odolnosti městské protihlukové clony (MPHC) byly provedeny experimenty simulující reálné situace, které mohou nastat při provozu tramvajové tratě nebo v důsledku vandalismu. Celkem proběhly čtyři typy zkoušek: působení odlétávajících jisker při broušení kolejnic, zapálené cigarety, hořící sirky a malého plamene.

Výsledky ukázaly, že clona vykazuje dobrou odolnost vůči běžným iniciačním zdrojům. Při simulaci prací v koleji, kdy byla vystavena odlétávajícím jiskrám, došlo pouze k mírnému nárůstu teploty a riziko vznícení je zanedbatelné. Podobně nízké riziko bylo potvrzeno i u odložené cigarety.

Za nejvíce rizikový scénář lze považovat cílené zapálení malým plamenem, typicky zapalovačem. V těchto případech docházelo k lokálnímu vzplanutí a omezenému šíření plamene po povrchu prvku. Oheň se však ve všech pokusech během několika minut samovolně uhasil a rozsah poškození zůstal lokální. Riziko takové události je vyšší zejména v době s delšími intervaly spojů, kdy by mohlo dojít ke zpoždění při zpozorování a nahlášení požáru.



Obr. 4 Zkouška působení malého plamene na přední hranu clony.

Je nutné zdůraznit, že testy probíhaly na vysušeném prvku. V provozních podmínkách bude clona vystavena povětrnostním vlivům, a tedy i vyšší vlhkosti, která pravděpodobnost vznícení snižuje. Tyto zkoušky je proto třeba chápat jako prvotní orientační ověření a identifikaci nejrizikovějších situací, na jejichž základě lze navrhnout cílenější testy v budoucnu [4].

4. Nácvik vyproštění HZS

Cílem cvičného zásahu, který proběhl v květnu 2019 na tramvajové trati v Praze 4 – Braníku mezi stanicemi Pobřežní cesta a Přístaviště, bylo prakticky si vyzkoušet záchranu osoby zaklíněné mezi protihlukovou clonou a tramvajovým vozem [5].

Při cvičném zásahu byla MPHC hasiči překonána v řádu jednotek minut. Dílec stěny MPHC byl s použitím páčidla jednoduše uvolněn a následně byly rozebrány část stěny, čímž vznikl dostatečný prostor pro vyproštění zaklíněné figuríny [5].

V druhé fázi cvičné akce bylo hasiči provedeno pokusné rozřezání clony řetězovou motorovou pilou (Obrázek 5). I tento způsob se ukázal jako efektivní pro překonání clony [5].



Obr. 5 Pokusné rozřezání clony řetězovou motorovou pilou.

Během celého vývoje clony byl kladen důraz na možnost jejího rychlého odstranění v případě potřeby. Speciální pojený gumový recyklát, z něhož je clona vyrobena, umožňuje rychlou destrukci například s pomocí řetězových nebo rozbrušovacích pil, jak bylo ověřeno i během cvičného zásahu [5].

4. Závěr

Prováděné zkoušky a dlouhodobé sledování potvrdily, že městská protihluková clona představuje efektivní a perspektivní opatření pro snížení hlukové zátěže v blízkosti tramvajových tratí, zejména v hustě zastavěných městských oblastech, kde nelze využít konvenční protihlukové stěny.

Na základě tříletého provozu v lokalitě Praha–Braník a sedmiletého provozu v lokalitě Praha Nový Hloubětín lze konstatovat, že clona nevykazuje významné závady, nedochází k rozpadu materiálu a je zajištěna barevná stálost. Navržený systém uložení MPHC v lokalitě Nový Hloubětín prokázal po sedmi letech dostatečnou stabilitu – nedochází k posunům ani deformacím konstrukce.

Akustická účinnost byla potvrzena v obou lokalitách. U tramvajů typu T3SU a T3R se pohyboval útlum v rozmezí 3 - 4 dB, zatímco u vozidel typů 14T, 15T a KT8D, díky příznivému tvaru spodní části skříně, dosahoval až 5 dB.

Testy požární odolnosti ukázaly, že při běžných provozních vlivech je riziko vznícení minimální. I v případech cíleného zapálení došlo pouze k lokálnímu poškození prvku, přičemž oheň vždy samovolně zhasl. Cvičný zásah složek IZS navíc potvrdil, že clonu lze v případě mimořádné události překonat v krátkém čase, což splňuje požadavky na bezpečnost provozu.

Výsledky tedy dokládají, že městská protihluková clona může být vhodným doplňkem souboru pasivních protihlukových opatření, který je dlouhodobě provozně spolehlivý a přináší měřitelný hlukový útlum. Do budoucna je vhodné navázat podrobnějšími zkouškami zaměřenými na životnost, údržbu a odolnost vůči specifickým městským podmínkám.

Literatura

- [1] ČÍŽKOVÁ, P. and L. LOMOZ. Comparison of efficacy of low and high acoustic screens. *Akustika*. 2014, 22(22), 28-36. ISSN 1801-9064.
- [2] ČÍŽKOVÁ, P. and L. LOMOZ. The effectiveness of a low height noise barrier. In: 14th GeoConference on ECOLOGY, ECONOMICS, EDUCATION AND LEGISLATION. 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Albena, 2014-06-17/2014-06-26. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2014. pp. 711-718. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7105-18-6. DOI 10.5593/SGEM2014/B52/S20.094
- [3] Lomoz, L. Aplikace městské protihlukové clony na území hl. města Prahy In: Sborník 102. akustického semináře. Praha: Česká akustická společnost, 2022. ISBN 978-80-01-07047-5.
- [4] Mašková, Z.; Bret, O. The fire characteristics of the Municipal noise absorbing screen In: 11th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists (YS2019). Bristol: IOP Publishing Ltd., 2019. vol. 566. ISSN 1757-899X.
- [5] ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Protihluková clona – cvičení HZS DPP. Tisková zpráva, Praha, 25. 5. 2019.
- [6] Váňová, P.; Bret, O. The Municipal Noise Absorbing Screen in Praha Modřany, *Akustika*. 2017, 28(28), 3-12. ISSN 1801-9064.

Poděkování

Práce a měření na zkušebních úsecích Městské protihlukové clony byly realizovány s podporou projektu Koncepty Fakulty stavební pro Prahu 2017 řešeného v rámci Operačního programu Praha – Pól růstu ČR, reg. č. projektu CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_040/0000377 (zkušební úsek Hloubětín).

Stanovení hodnot pro rozhodování o nasazení akumulátorových jednotek nebo elektrizaci tratě na základě dotazníkového šetření

Ing. Jiří Krejčí

Fakulta dopravní ČVUT v Praze

Konviktská 293/20, 110 00, Praha 1 – Staré Město

e-mail_1: krejcyj31@fd.cvut.cz

Abstrakt

Předmětem tohoto článku je prezentace výsledků dotazníkového šetření, které slouží jako podklad pro vytvoření rozhodovacího mechanismu určeného k posouzení, zda je konkrétní železniční trať vhodnější pro elektrizaci, nebo pro nasazení akumulátorových vozidel.

Klíčová slova

Železniční doprava, životní prostředí, alternativní pohony, jednotky BEMU, elektrizace, Saatyho metoda.

Determining Values for Decision-Making on the Deployment of Battery Electric Multiple Units or Railway Electrification Based on a Questionnaire Survey

Abstract

The subject of this article is the presentation of the results of a questionnaire survey, which serves as a basis for the development of a decision-making mechanism designed to assess whether a particular railway line is more suitable for electrification or for the deployment of battery electric multiple units.

Keywords

Railway transport, environment, alternative propulsion, BEMU units, electrification, Saaty's method.

1. Úvod

Otázka volby vhodného způsobu zajištění provozu železniční dopravy na neelektrizovaných regionálních tratích nabývá v posledních letech na stále větším významu. Na jedné straně stojí klasická elektrizace, která přináší stabilní a provozně osvědčené řešení, na druhé straně pak moderní akumulátorová vozidla (BEMU – battery electric multiple unit), jež představují flexibilní alternativu umožňující provoz i bez rozsáhlých infrastrukturních zásahů. Rozhodnutí, která z těchto možností je v konkrétních podmínkách vhodnější, nelze stanovit pouze na základě technických parametrů, ale je nutné zohlednit i provozní, geografické a ekonomické aspekty.

Článek nejprve stručně přibližuje aktuální problematiku spojenou s útlumem využívání fosilních paliv na železnici. Hlavní pozornost je však věnována výsledkům dotazníkového šetření mezi odborníky z oblasti železniční dopravy. Tyto výsledky tvoří základ pro vytvoření rozhodovacího nástroje, který má napomoci při určování, zda je pro konkrétní trať vhodnější elektrizace, nebo provoz akumulátorových jednotek s možností budoucí elektrizace celé sítě.

2. Aktuální postoj k využití fosilních paliv a alternativních pohonů na železnici

2.1. Celosvětový pohled na udržitelnost

V současnosti si společnost stále více uvědomuje nutnost ochrany životního prostředí a zachování přírodních zdrojů pro budoucí generace. Tento přístup je označován jako udržitelný rozvoj, jehož cílem je uspokojovat současné potřeby lidstva, aniž by tím byly ohroženy potřeby generací příštích. Z hlediska globálních environmentálních problémů hraje zásadní roli uhlík obsažený ve fosilních palivech. Při jejich spalování dochází k oxidaci uhlíku na oxid uhličitý, který se uvolňuje do atmosféry. Od počátku intenzivního využívání fosilních paliv vzrostlo jeho množství v atmosféře z přibližně 3 500 miliard tun na současných zhruba 5 200 miliard tun. Tento nárůst oslabil schopnost atmosféry udržovat teplotní rovnováhu planety a významně přispěl k probíhajícím klimatickým změnám, které jsou v řadě ohledů považovány za nevratné [1].

V reakci na rostoucí koncentraci emisí přijalo 195 států světa, včetně České republiky, v prosinci 2015 Pařížskou dohodu OSN. Jejím cílem je omezit nárůst průměrné globální teploty oproti předindustriální éře na maximální hodnotu mezi 1,5 a 2 °C. Současný stav přitom ukazuje, že teplota je již o 1,1–1,2 °C vyšší než před průmyslovou revolucí. Podle Mezinárodní energetické agentury (IEA) je pro dosažení tohoto cíle nezbytné ukončit spalování uhlí, ropných produktů a zemního plynu nejpozději do roku 2050. Jednotlivé sektory závislé na fosilních palivech tak disponují časovým horizontem zhruba 25 let, během něhož musí snížit svou energetickou náročnost a přejít na obnovitelné zdroje energie [1].

Významná otázka se týká dopravy, která představuje klíčový spotřebitelský sektor. Pod tlakem legislativních opatření i dotačních programů směřuje ke snižování spotřeby energie a k náhradě fosilních paliv čistšími zdroji. Tento proces přispívá nejen k redukci provozních nákladů, ale především ke snižování globálních emisí oxidu uhličitého a lokálních exhalací, jež negativně ovlivňují kvalitu ovzduší.

2.2. Náhrada vozidel nezávislé trakce na železnici

V posledních letech se otázka snižování emisí a postupného útlumu fosilních paliv stala prioritou i v oblasti železniční dopravy. Ministerstvo dopravy České republiky proto v roce 2023 představilo *Koncepci rozvoje elektrické trakce*, která určuje postup elektrizace modernizovaných i stávajících tratí a konverzi stejnosměrné napájecí soustavy. Časový harmonogram těchto staveb je ovšem značně závislý na povolovacích a investičních procesech, což vytváří nejistotu v predikci budoucích parametrů infrastruktury. [1]

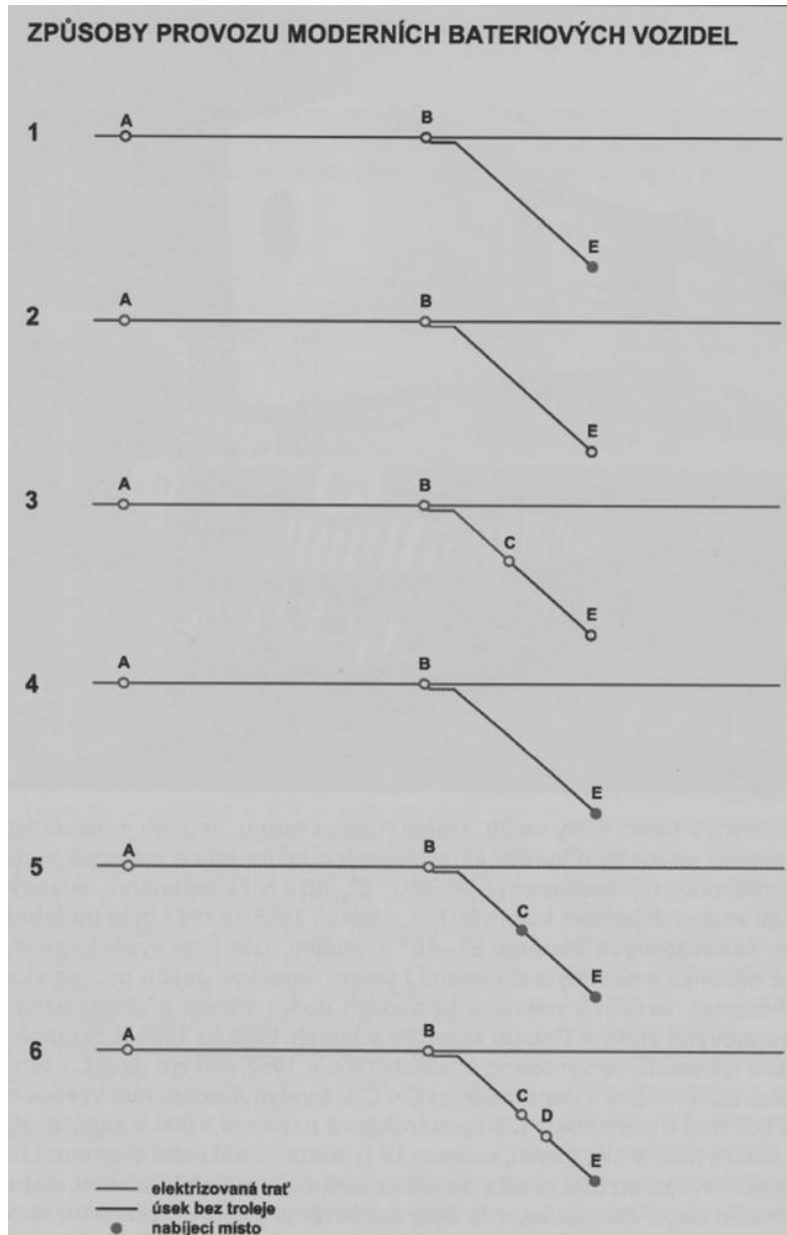
V praxi to znamená, že elektrizace bude v první fázi realizována především na významnějších rychlíkových tazích (např. připravovaná elektrizace úseku Veselí nad Lužnicí – České Velenice). Regionální tratě s menší intenzitou provozu tak zůstávají bez trakčního vedení a objednatelé dopravy, zejména kraje, proto hledají alternativní řešení pro náhradu vozidel se spalovacími motory. Do popředí zájmu se dostávají zejména akumulátorové jednotky (BEMU – battery electric multiple unit) a vodíkové jednotky (HEMU/HMU – hydrogen electric multiple unit). V obou případech se jedná o využití elektrické energie k samotnému pohybu, rozdíl však spočívá v uložení energie. V jednom případě je energie uložena v přímo v akumulátorech, v druhém pak ve formě vodíku využívaného v palivovém článku.

Vodíkový pohon může na první pohled působit výhodněji díky delšímu dojezdu (výrobci uvádí 600 až 800 km, v případě akumulátorových vozidel je dojezd zhruba mezi 80 až 120 km při možnosti obnovy energie v obou koncových stanicích), ale naráží na vysoké energetické ztráty. Provoz vozidel na palivové články vyžaduje přibližně dvojnásobek energie (souvisí s výrobou čistého vodíku) oproti akumulátorovému řešení, což zvyšuje provozní náklady. Zároveň Česká republika nemá dostačující infrastrukturu pro distribuci samotného plynu. Alternativou je spalování vodíku přímo ve spalovacím motoru, které je sice méně účinné než palivové články, ale umožňuje využít vodík nižší čistoty a tím snížit náklady. Tento koncept začínají zkoumat například v Irsku, kde byla v roce 2023 oznámena modernizace dieselového motoru na vodíkový spalovací. Přestože jde o technologii v rané fázi vývoje, její výhodou jsou nižší pořizovací náklady a možnost využít stávající infrastrukturu i know-how [2, 3].

2.3. Pravidelný provoz akumulátorových vozidel

Z předchozí kapitoly je vyplývající, že pro pravidelný provoz na neelektrizovaných tratích v České republice se jako vhodnější řešení jeví akumulátorové jednotky (BEMU). Při jejich nasazení na pravidelných linkách je ale nutné zohlednit řadu aspektů, zejména vzdálenost mezi místy, kde je možné obnovit energii v akumulátoru. V případě statického nabíjení probíhá dobíjení během pobytu v koncové stanici. Pokud je tato stanice vybavena trakčním vedením (např. 25 kV, 50 Hz), je možné akumulátor dobít na plnou kapacitu přibližně za 20 minut. Tento postup je výhodný především tehdy, když se elektrizovaná infrastruktura nachází v obou obrátových bodech, příkladem je trať Tábor – Písek. Alternativou je dynamické nabíjení, kdy se jednotka dobíjí během jízdy po elektrizovaném úseku. V tomto režimu je však část energie spotřebována přímo na pohon, a pro akumulátor tak zůstává přibližně 60 % z celkového příkonu [3].

Maximální vzdálenost, kterou může jednotka ujet bez přístupu k trakčnímu vedení, závisí na kapacitě baterie. Jak již bylo zmíněno, výrobci zpravidla uvádějí dojezd v rozmezí 60 až 120 km. V praxi je však nutné odlišit teoretický maximální dojezd, hodnoty na začátku a konci životnosti akumulátoru a zejména provozně bezpečný dojezd, do něhož je započtena rezerva pro mimořádné situace. Běžně se tak při návrhu provozu počítá s jistotou v rozmezí 60 až 80 km. Pokud lze jednotku dobít v obou koncových bodech, může délka ramene odpovídat tomuto dojezdu. V případě nabíjení pouze v jednom směru je nutné délku ramene zhruba zkrátit na polovinu [3].



Obr. 1 Možné scénáře provozu akumulátorových vozidel.

[4]

Na obr. 1 jsou přehledně znázorněny základní provozní režimy akumulátorových jednotek, a to jak se statickým, tak i dynamickým nabíjením v závislosti na infrastruktuře. Silnější přímka znázorňuje úseky s trakčním vedením, slabší úseky bez elektrizace a plná kolečka označují místa, kde je možné akumulátor dobíjet.

Možnosti prodloužení dojezdu ilustrují varianty 5 a 6. Ve variantě 5 je v mezilehlé stanici zřízena nabíjecí infrastruktura, která umožňuje krátké dobití během plánovaného pobytu, například při křižování vlaků. Varianta 6 naopak ukazuje zřízení trakčního vedení v mezistaničním úseku, kde probíhá dynamické dobíjení. Tento koncept takzvaných nabíjecích ostrovů je výhodný zejména v případech, kdy více linek využívá stejný traťový úsek, infrastruktura pak může být sdílena a ekonomicky efektivní.

V České republice byl v lednu 2025 zahájen pilotní provoz akumulátorových jednotek na lince Ostrava – Veřovice. Provoz zajišťují jednotky řady 690 společnosti Škoda Transportation a.s., konstrukčně vycházející z elektrické jednotky řady 650 RegioPanter. Nově je vybavena akumulátorem o využitelné kapacitě 320 kWh, umístěným na střeše vozidla. Trasa linky vede po elektrizované trati z Ostravy do Sedlnic, odkud pokračuje zhruba 21 km po neelektrizované trati do Veřovic (odpovídá variantě 3 na obr. 1).

Podle terénního průzkumu autora článku měla jednotka po příjezdu do žst. Veřovice přibližně 55 % zbývající energie v akumulátoru. Spotřeba je zde výrazně ovlivněna sklonovými poměry tratě, která směrem do Veřovic stoupá a výškový rozdíl mezi Sedlnicemi a Veřovicemi činí přibližně 202 m. Při návratu naopak jednotka využívá klesání, intenzivně rekuperuje a tím navyšuje energetickou rezervu. To výrazně zvyšuje celkovou efektivitu provozu. Další zajímavostí je, že jednotky umožňují i nabíjení z trakční soustavy 3 kV stejnosměrné napájecí soustavy. K červnu 2025 měly vlaky najeto více než 300 000 km bez větších potíží a objednatel provozu uvádí nárůst počtu cestujících o 16 % oproti době, kdy na rameni jezdila klasická motorová trakce.

3. Dotazníkové šetření

Cílem každého objednatele železniční dopravy je zajistit, aby byly jednotlivé spoje dané linky maximálně využívány a současně aby byla doprava co nejlépe integrována do širší dopravní obslužnosti území. K tomu je nezbytné znát řadu parametrů, například jak dlouhou dobu jsou cestující ochotni denně věnovat dojížděcí vlakem, nebo jaký je počet spojů, které po dané trati pravidelně projíždějí. Z tohoto důvodu bylo realizováno dotazníkové šetření, jehož výsledky budou sloužit jako podklad pro další hodnocení provozní vhodnosti tratí, a to buď pro nasazení akumulátorových jednotek, nebo pro elektrizaci a provoz vozidel se závislou trakcí.

3.1. Stanovení základních veličin

Pro samotnou realizaci dotazníkového šetření bylo nejprve nezbytné stanovit, které vstupní veličiny mají na pravidelný provoz nejnvýznamnější vliv. Následující kapitoly se věnují popisu jednotlivých parametrů.

3.1.1. Infrastruktura

Prvním hodnoticím kritériem jsou technické parametry a technický stav tratě. Pokud se trať nachází ve špatném stavu a není plánována její obnova, nelze ji považovat za perspektivní osu dopravní obsluhy [5].

Z hlediska významu je klíčovým parametrem traťová rychlost, která má přímý vliv na konkurenceschopnost železnice vůči jiným druhům dopravy. Vhodnější je však pracovat s ukazatelem cestovní rychlosti, neboť lépe odráží reálnou dobu přepravy a umožňuje srovnání tratí různé délky [5].

Dalším důležitým faktorem je traťová třída zatížení, která může indikovat potenciál pro nákladní dopravu, ta je obvykle argumentem ve prospěch elektrizace. Je však třeba zohlednit rozdílnou hmotnost jednotlivých typů vozidel. Například akumulátorový kontejner jednotky řady 690 RegioPanter váží 2 770 kg a vozidlo je vybaveno třemi kontejnery. Oproti tomu běžná elektrická jednotka řady 650 tuto zátěž nenese [5].

Významnou roli hraje i prostorové umístění stanice vůči sídlům. Stanice vzdálené od center obcí mají nižší atraktivitu než stanice dostupné pěšky či navázané na jiné druhy dopravy. Naopak pozitivní vliv na hodnocení má kvalitní integrace do dopravního systému, například návaznost na autobusové linky, P+R parkoviště nebo cyklistickou dopravu (v poslední době podpořenou elektrokoly a elektrokoloběžkami) [5].

3.1.2. Provoz

Další okruh se týká intenzity provozu. Důležité je zaobírat se nejen aktuálním provozem, ale i výhledem do budoucna. Je přitom nutné zachovat objektivní přístup, neboť úvahy objednatelů veřejné dopravy nemusí vždy odpovídat skutečnému potenciálu tratě. V praxi lze často nalézt dva extrémní přístupy:

- železnice je i po modernizaci přehlížena a nedochází k přesunu dopravy z autobusů
- nebo je naopak nasazeno vozidlo s vyšší kapacitou, než odpovídá reálné poptávce

Provoz zároveň zdatelně ovlivňuje skutečný počet vlakových spojů a jejich obsazenost, stejně jako potenciální zdroje přepravní poptávky, jakýmž jsou průmyslové areály, logistická centra, významní zaměstnavatelé, vzdělávací a zdravotnická zařízení či instituce veřejné správy [5].

Dalším hlediskem je konkurenceschopnost vůči jiným druhům dopravy, zejména individuální automobilové dopravy a autobusové dopravy. Zároveň je při rozhodování konceptu provozu zahrnout i očekávaný rozvoj území,

plánovaná výstavba obytných celků, průmyslových zón či logistických areálů může výrazně navýšit budoucí přepravní potřeby [5].

3.1.3. Význam trati

Další důležitý aspekt představuje kategorizace tratě. Významné je například její zařazení do evropské sítě TEN-T, které zvyšuje strategickou hodnotu a pravděpodobnost získání finanční podpory [5].

Mezi významný aspekt může patřit, zda je trať pravidelně obsluhována v celé své délce, nebo pouze v krátkém úseku. Elektrizace může být pak ekonomicky odůvodněná jen v části tratě, zatímco zbylé úseky mohou obsluhovat akumulátorové jednotky, které díky dynamickému dobíjení na elektrizovaných částech prodlouží svůj dojezd [5].

Vzhledem k tomu, že páteřní tratě české železniční sítě již dnes často fungují na hranici kapacity, je vhodné posuzovat i možnost využití tratě jako objízdné trasy při mimořádnostech nebo výlukách. Avšak dnešní investiční akce do redundance zvyšuje odolnost dopravního systému. Typickým příkladem je vznik mimořádnosti v okolí žst. Pečky, kdy bylo nutné vlaky odklánět přes Kolín a Nymburk do Poříčan. Připravenost objízdných tras s elektrickým provozem výrazně posiluje robustnost celé sítě [5].

3.1.4. Technické zařízení tratě

Elektrizace zahrnuje nejen stavbu trakčního vedení, ale také související napájecí a distribuční infrastrukturu. Klíčovou roli hrají trakční napájecí stanice a další pevná zařízení. Moderní stavby dnes běžně zahrnují i opatření proti indukovanému napětí v kabelových trasách [5].

3.2. Dotazníkové šetření

Na základě veličin uvedených v předchozí kapitole byl sestaven dotazník, jehož výsledky by měly sloužit jako podklad pro vytvoření rozhodovacího nástroje. Tento nástroj má umožnit objektivně určit, zda je konkrétní železniční trať vhodnější pro provoz akumulátorových vozidel, nebo pro elektrizaci a následný provoz vozidel se závislou trakcí. Samotný dotazník byl rozdělen do dvou částí, a to konkrétně na určení vstupních hodnot a na porovnání vah mezi jednotlivými kategoriemi. Do průzkumu byli zapojeni odborníci z oblasti železniční dopravy, a to jak z řad objednatelů, dopravců a správců infrastruktury, tak i z akademické sféry. Podrobné výsledky šetření jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

3.2.1. Vstupní data

Oslovení odborníci měli za úkol vyplnit hodnoty v tabulce s parametry (viz Tab. 1). Zadání předpokládalo reálnou, již existující neelektrizovanou trať, na niž by došlo k náhradě vozidel nezávislé trakce. Většinou se uvažovalo o tratích regionálního významu, nikoliv o páteřních koridorových spojeních. Pro lepší představu lze uvést příklady jako Tábor – Písek – Strakonice, Praha – Dobříš, Olomouc – Krnov – Ostrava nebo Stará Paka – Ostroměř – Chlumec nad Cidlinou.

Účastníci průzkumu byli předem seznámeni s tím, že je zapotřebí rozlišovat hodnoty pro provoz na elektrizovaných tratích s převahou osobní dopravy, se smíšeným provozem a s převahou dopravy nákladní. Stejný postup byl uplatněn i při hodnocení provozu vozidel s akumulátory. Samostatná kategorie pro nákladní dopravu však byla u akumulátorových jednotek záměrně vynechána, jelikož se tato vozidla v současnosti pro nákladní přepravu prakticky nevyužívají. Výsledné rozdělení do pěti skupin (tři pro vozidla závislé trakce a dvě pro BEMU) umožnilo podrobnější a přesnější vyhodnocení.

Jedním z klíčových parametrů byl například limit cestovní doby. Z pohledu běžného cestujícího se hodnoty pro osobní, nákladní i smíšený provoz neliší, pro dojíždění je důležitý pouze čas cesty. Odborníci však mohli hodnoty rozlišit. Například pro osobní dopravu mohou stanovit maximální cestovní dobu 50 minut, zatímco u smíšeného provozu připustit delší dobu (např. 65 minut), protože pomalejší nákladní vlaky mohou prodloužit jízdní dobu linek osobní dopravy.

V následujících odstavcích jsou vysvětleny jednotlivé parametry, na které byli respondenti dotazováni:

- *Jaké maximální délky jste ochotni tolerovat cestovní dobu*
Respondenti si představili, že jako cestující využívají železniční dopravu pro každodenní dojíždění, například do zaměstnání či školy. Úkolem bylo stanovit maximální dobu, kterou jsou ochotni strávit cestováním uvedeným způsobem. Příkladem může být spojení měst Tábor – Praha, kde jízda expresem trvá 60 minut. Pokud by tato doba byla považována za maximální přijatelnou, znamená to, že při jejím překročení (např. 61 minut) by cestující začal zvažovat jiné způsoby dopravy, například individuální automobilovou dopravu nebo linkové autobusy.
- *Jaké průměrné délky by měla dosahovat cestovní doba*
Tato hodnota byla vypočtena jako průměr mezi maximální přijatelnou dobou a velice výhodnou dobou cestování.
- *Jaké délky dosahuje velice výhodná cestovní doba*
V tomto případě respondenti stanovovali časovou hodnotu, při níž by o jiném druhu dopravy vůbec neuvažovali. Příkladem je spojení Benešov – Praha, kde jízda rychlíkem trvá 39 minut. Tato doba je považována za natolik výhodnou, že by byla železniční doprava jasnou volbou. Pokud by došlo k mírnému prodloužení, například na 40 minut, spadla by hodnota do kategorie spíše tolerantní (viz maximální délka). Naopak zkrácení pod tuto hranici by ještě více zvýhodnilo železniční dopravu.
- *Jaké jsou požadavky na geometrické parametry koleje*
Respondenti uváděli preferované geometrické parametry koleje v závislosti na druhu provozu. Příkladem může být požadavek na minimální poloměr oblouku větší než 500 m, odpovídající traťovou

rychlost, přípustné sklonové poměry a další technické charakteristiky (jak bylo uvedeno, dotazník byl směřován na železniční odborníky, nikoliv na respondenty z řad veřejnosti).

- *Jaká je alespoň požadována traťová třída zatížení*
Úkolem respondentů bylo stanovit minimální třídu zatížení tratě s ohledem na uvažovaný provoz.
- *Jaký by měl být alespoň charakter provozu*
Respondenti volili, zda má mít trať alespoň lokální, regionální, celostátní nebo mezinárodní význam.
- *Je nutné, aby byla trať součástí nějakého koridoru*
V tomto parametru respondenti uváděli, zda je pro ně důležité, aby daná trať byla součástí některého z železničních koridorů, a to v závislosti na typu provozu na trati.

Dále byly respondenti požádáni o stanovení počtu párů vlaků (osobních a nákladních) za den. U tratí s výhradně osobním provozem akumulátorových vozidel nebyl nákladní provoz zohledněn. Výsledky poskytly představu o intenzitě dopravy, která by stanovila buď investici do elektrizace, nebo provoz BEMU jednotek.

Závěrečná část dotazníku se zaměřila na konkurenceschopnost železnice vůči autobusům a IAD. Odborníci měli uvést maximální časový rozdíl, při kterém by cestující ještě preferovali železnici. Za ilustrační příklad lze považovat následující situaci: *Cesta železniční dopravou trvá 10 minut. O kolik minut by musela být cesta VHD rychlejší, aby si respondenti zvolil právě VHD? Pokud by cesta VHD trvala 6 minut, do tabulky měl respondent zadat hodnotu 4 minuty.* Stejným principem se určovala i hodnota pro IAD.

Tab. 1 Vstupní data v rámci dotazníkového šetření

Vstupní parametry							
Část 1							
	Provoz zajištěn vozidly závislé trakce			Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly			
	Převážně provoz osobní dopravy	Převážně provoz nákladní dopravy	Smišený provoz	Pouze osobní doprava	Smišený provoz s výraznou převahou osobní dopravy		
Jaké maximální délky jste ochotni tolerovat cestovní dobu	0	0	0	0	0	minuty	
Jaké průměrné délky by měla dosahovat cestovní doba	0	0	0	0	0	minuty	
Jaké délky dosahuje velice výhodná cestovní doba	0	0	0	0	0	minuty	
Jaké jsou požadavky na geometrické parametry koleje	-	-	-	-	-	-	
Jaká je alespoň požadována traťová třída zatížení	-	-	-	-	-	Traťové třídy	
Jaký by měl být alespoň charakter provozu	-	-	-	-	-	-	
Je nutné, aby byla trať součástí nějakého koridoru	-	-	-	-	-	-	
Část 2							
	Osobní vlaky			Nákladní vlaky			
	Minimálně	Průměrně	Max, případně více než	Minimálně	Průměrně	Max, případně více než	
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - převážně osobní doprava	0	0	0	0	0	0	párů za den
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - převážně nákladní doprava	0	0	0	0	0	0	párů za den
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - smíšený provoz	0	0	0	0	0	0	párů za den
Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly - pouze osobní doprava	0	0	0				
Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly - smíšený provoz s výraznou převahou osobní dopravy	0	0	0	0	0	0	párů za den
Konkurenceschopnost železniční dopravy vůči VHD	0	minuty					
Konkurenceschopnost železniční dopravy vůči IAD	0	minuty					

[zdroj autor]

V rámci průzkumu bylo osloveno celkem 20 respondentů, přičemž zpět se vrátilo 10 kompletně vyplněných dotazníků. Z jejich výsledků vyplývá, že v současnosti jsou odborníci ochotni cestovat železniční dopravou přibližně 60 minut. Za velmi výhodnou považují cestovní dobu do 40 minut, přičemž průměrná hodnota se pohybuje okolo 50 minut. Na tratích s převahou nákladní dopravy se tato hodnota blíží až k 60 minutám.

V otázce geometrických parametrů koleje se všichni respondenti shodli na potřebě minimálního poloměru oblouku. Vyhodnocení ukázalo, že tento parametr by neměl klesnout pod 300 metrů, a v případě tratí s vyšším zastoupením nákladní dopravy dokonce pod 400 metrů. Důvodem je skutečnost, že nákladní vozidla nemohou plně využít nedostatku převýšení a pro dosažení vyšších rychlostí potřebují větší poloměry oblouků. Tento trend potvrzuje i navazující otázka týkající se právě hodnoty nedostatku převýšení: ve většině případů byla preferována hodnota 150 mm, zatímco u tratí s převahou nákladní dopravy se požadavek snížil na 130 mm.

Pokud jde o traťovou rychlost, průměrně vyšší hodnoty byly uváděny u elektrizovaných tratí. Je to dáno tím, že akumulátorová vozidla jsou uvažována především pro tratě menšího významu, tedy tratě lokálního či regionálního charakteru, kde se traťové rychlosti běžně pohybují níže.

V oblasti třídy zatížení se názory respondentů zcela neshodovaly, nicméně nejčastěji se objevovala volba třídy C3 (20 t/náprava, 7,2 t/bm vozidla) a třídy D4 (22,5 t/náprava, 8,0 t/bm vozidla). Třída D4 je dnes jednou z nejrozšířenějších na území České republiky. Podobná nejednotnost se projevila i při určování charakteru provozu. Přestože byli účastníci upozorněni, že se nejedná o významnou koridorovou trať, výsledky ukazují, že na tratích s oběma typy trakce by měl být zajištěn minimálně regionální charakter provozu. V otázce koridorového zařazení pak panovala shoda. Žádný z respondentů nepovažoval za nezbytné, aby byla trať součástí železničního koridoru.

Ve druhé části dotazníku, zaměřené na počty párů vlaků, se ukázalo, že většina respondentů považuje za minimální požadavek na tratích s osobní nebo smíšenou dopravou více než 10 párů osobních vlaků denně. Optimální by pak bylo, kdyby tato hodnota přesahovala hranici 20 párů. Výjimku tvoří tratě s převahou nákladní dopravy, kde je akceptovatelná i nižší frekvence, konkrétně méně než 10 párů osobních vlaků denně, přičemž i maximální hodnoty zde zůstávají pod hranicí 20 párů. U nákladních vlaků se počty párů obecně pohybují výrazně níže, s výjimkou tratí s dominantním nákladním provozem, kde jsou logicky vyšší.

Z hlediska konkurenceschopnosti železnice vůči jiným druhům dopravy respondenti uvedli, že by zvažovali cestu vlakem i tehdy, pokud by cesta autobusy veřejné hromadné dopravy (VHD) byla až o 17 minut rychlejší. V případě individuální automobilové dopravy (IAD) je tato tolerance mírně nižší, přibližně 15 minut.

Tab. 2 Výsledná data v rámci dotazníkového šetření

Vstupní parametry							
Část 1							
	Provoz zajištěn vozidly závislé trakce			Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly			
	Převážně provoz osobní dopravy	Převážně provoz nákladní dopravy	Smišený provoz	Pouze osobní doprava	Smišený provoz s výraznou převahou osobní dopravy		
Jaké maximální délky jste ochotni tolerovat cestovní dobu	64	73	68	65	68	minuty	
Jaké průměrné délky by měla dosahovat cestovní doba	48	57	52	50	54	minuty	
Jaké délky dosahuje ve více výhodná cestovní doba	33	40	35	35	40	minuty	
Jaké jsou požadavky na geometrické parametry koleje	Poloměr oblouku	367	450	433	333	400	m
	Nedostatek převýšení	150	130	150	150	150	mm
	Rychlost	110	100	110	90	90	km/h
Jaká je alespoň požadována traťová třída	B1	1	0	0	0	0	-
	B2	1	1	1	1	1	-
	C2	2	0	0	3	0	-
	C3	4	1	2	3	3	-
	C4	0	0	1	0	0	-
	D2	0	1	0	1	1	-
	D3	0	1	1	0	1	-
	D4	0	4	3	0	2	-
Jaký by měl být alespoň charakter provozu	Mezinárodní	0	0	1	0	0	-
	Celostátní	1	5	3	2	4	-
	Regionální	5	4	5	7	5	-
	Lokální	4	1	1	1	1	-
Je nutné, aby byla trať součástí nějakého koridoru	ne	ne	ne	ne	ne	-	
Část 2							
	Osobní vlaky			Nákladní vlaky			
	Minimálně	Průměrně	Max, případně více než	Minimálně	Průměrně	Max, případně více než	
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - převážně osobní doprava	12	19	26	2	4	6	párů za den
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - převážně nákladní doprava	9	12	16	7	11	15	párů za den
Provoz zajištěn vozidly závislé trakce - smišený provoz	11	16	21	4	8	11	párů za den
Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly - pouze osobní doprava	13	19	24				
Provoz zajištěn akumulátorovými vozidly - smišený provoz s výraznou převahou osobní dopravy	13	18	23	2	4	6	párů za den
Konkurenceschopnost železniční dopravy vůči VHD	17	minuty					
Konkurenceschopnost železniční dopravy vůči IAD	15	minuty					

[zdroj autor]

3.2.2. Stanovení vah pomocí Saatyho metody

Jak již bylo zmíněno, v dalším kroku dotazníkového šetření měli respondenti za úkol stanovit vzájemné váhy hlavních kategorií. Tyto kategorie vycházely ze základních veličin (viz kapitola 3.1) a tedy zahrnovaly následující čtyři hlavní skupiny: *Infrastruktura*, *Provoz*, *Význam tratě* a *Vybavenost*. Každá z nich byla dále rozdělena na dílčí podkategorie, jejichž detailní popis a výsledné váhy jsou uvedeny v odstavcích níže.

Pro určení vah byla zvolena Saatyho metoda, známá také jako Analytic Hierarchy Process (AHP). Jedná se o vícekritériální rozhodovací postup založený na párovém porovnávání jednotlivých kritérií. Hodnotitel přiřazuje relativní důležitost mezi dvojicemi prvků a intenzitu preference vyjadřuje číselnou škálou. V klasické podobě metoda využívá devítibodovou stupnici, nicméně v rámci dotazníku byla pro zjednodušení použita pouze třítbodová škála:

- 1 = oba prvky jsou stejně důležité
- 2 = mírně důležitější
- 3 = výrazně důležitější

Na základě těchto vstupů byla sestavena matice párového porovnání, z níž byl výpočtem odvozen prioritní vektor představující váhy jednotlivých kritérií.

Respondenti přiřazovali váhy ve dvou úrovních. Nejprve mezi hlavními kategoriemi a následně mezi jednotlivými podkategoriemi. Pro přehlednost je uveden následující seznam:

- *Infrastruktura*
 - *Cestovní doba* – čas potřebný k projetí posuzovaného úseku.
 - *Geometrické parametry koleje* – směrové a sklonové poměry tratě ovlivňující rychlost a provozní možnosti.
 - *Traťová třída zatížení* – maximální přípustná nápravová a hmotnostní zatížení tratě.
- *Provoz*
 - *Intenzita osobní dopravy* – počet spojů osobní dopravy během dne.
 - *Intenzita nákladní dopravy* – počet spojů nákladní dopravy během dne.
 - *Charakter provozu* – zařazení tratě z hlediska dopravní obsluhy (lokální, regionální, celostátní, mezinárodní).
 - *Cíle dojížděky* – existence významných cílů přepravy, jako jsou velcí zaměstnavatelé, školská zařízení, průmyslové podniky apod.
 - *Konkurenceschopnost* – schopnost železnice konkurovat VHD a IAD.

- **Význam tratě**
 - *Délka využití tratě* – možnost využít trať v celé délce, či pouze v určitém úseku.
 - *Součástí koridorů / kategorie drah* – začlenění tratě do sítě koridorů nebo její klasifikace podle druhu dráhy.
 - *Využití tratě jako objízdné* – význam tratě při mimořádnostech, výlukách a odklonech dopravy.

- **Vybavenost**
 - *Plán elektrizace* – zda je plánována elektrizace tratě, v jakém časovém horizontu a jakou roli mohou hrát akumulátorová vozidla při překlenutí období do výstavby trakčního vedení.
 - *Dostačující stávající napájecí systém* – posouzení, zda je současná napájecí infrastruktura dostatečná nebo bude nutná její modernizace či výstavba nových napájecích stanic.

Pro lepší ilustraci je uveden příklad hodnocení v rámci kategorie *Infrastruktura* (viz Tab. 3). Jeden z respondentů přisoudil nejvyšší význam cestovní době, kterou označil za zásadnější než geometrické parametry koleje i traťovou třídu zatížení. Při porovnání posledních dvou prvků považoval jejich význam za téměř totožný, s mírnou převahou geometrických parametrů. Výsledné zastoupení vah v této kategorii pak ukázalo, že cestovní doba dosáhla hodnoty 63,7 %, zatímco zbývající dvě podkategorie se dělily o menší část.

Celkové shrnutí hodnocení všech kategorií (viz Tab. 4) naznačilo, že většina respondentů považovala za nejvýznamnější kategorii *Provoz*, následovanou kategoriemi *Význam tratě* a *Vybavenost*. Nejnižší váhu měla kategorie *Infrastruktura*.

Tab. 3 Příklad stanovení vah jednotlivých prvků Saatyho metodou

Saatyho metoda - INFRASTRUKTURA							
	Cestovní doba	Geometrické parametry koleje	Traťová třída	Geometrický průměr	Geometrický průměr	Váhy kritérií	Váhy kritérií
Cestovní doba	1,00	3,00	3,00	173,2%	1,732	63,7%	0,637
Geometrické parametry koleje	0,33	1,00	2,00	57,7%	0,577	21,2%	0,212
Traťová třída	0,33	0,50	1,00	40,8%	0,408	15,0%	0,150
				CELKEM	2,718	100,0%	1,000

[zdroj autor]

Tab. 4 Shrnutí vah dle Saatyho metody

Saatyho metoda - SHRNUTÍ				
Základní parametry				
		Váhy kritérií	Váhy kritérií	Pořadí vah
	Infrastruktura	11,9%	0,119	4
	Provoz	45,7%	0,457	1
	Význam tratě	23,8%	0,238	2
	Vybavenost	18,6%	0,186	3
Dělení základních parametrů				
Infrastruktura	Cestovní doba	63,7%	0,637	1
	Geometrické parametry koleje	21,2%	0,212	2
	Traťová třída	15,0%	0,150	3
Provoz	Intenzita osobní dopravy	18,5%	0,185	3
	Intenzita nákladní dopravy	7,7%	0,077	5
	Charakter provozu	10,1%	0,101	4
	Cíle dojíždky	35,0%	0,350	1
	Konkurenceschopnost	28,7%	0,287	2
Význam tratě	Délka využití tratě	34,9%	0,349	2
	Součást koridorů / kategorie drah	16,8%	0,168	3
	Využití tratě jako objízdnu	48,4%	0,484	1
Vybavenost	Plán elektrizace	33,3%	0,333	2
	Dostačující stávající napájecí systém	66,7%	0,667	1

[zdroj autor]

Jak již bylo uvedeno v dříve, byli respondenti při vyplňování dotazníku požádáni, aby hodnotili situaci pro tři různé charaktery provozu. Jednalo se o provoz převážně osobní dopravou, smíšený provoz a provoz převážně nákladní dopravou. Toto členění bylo nutné zohlednit i při určování vah, protože

priority se mohou lišit podle provozního zaměření tratě. Například u tratě s převážně nákladní dopravou mohl respondent přiřadit vyšší význam *traťové třídě zatížení* než *cestovní době*.

Kromě charakteru provozu se do hodnocení promítal i fakt, zda trať spojuje dvě sídla s možností dalšího pokračování v obou směrech nebo končí v jedné koncové stanici. Tento rozdíl má vliv například na parametr *využitelnosti tratě jako objízdné*.

Z uvedených důvodů vyplňovali respondenti hodnocení celkem šestkrát:

- Dvě sídla (na obou koncích tratě jsou dopravní uzly s možností pokračování)
 - Převážně osobní doprava
 - Smíšený provoz
 - Převážně nákladní doprava
- Jedno sídlo (trať končí v jedné koncové stanici)
 - Převážně osobní doprava
 - Smíšený provoz
 - Převážně nákladní doprava

3.2.3. Další vývoj práce

V rámci dotazníkového šetření se podařilo shromáždit první soubor dat (dotazník vrátilo 10 respondentů z oslovených 20). Cílem další fáze je oslovit širší okruh odborníků, aby se zvýšila vypovídací schopnost výsledků a podklady pro rozhodovací mechanismus byly co nejpřesnější.

Na základě získaných vstupních dat bude možné sestavit hodnotící škálu, která umožní určit, zda je pro konkrétní trať vhodnější realizovat elektrizaci, nebo zvolit provoz akumulátorových vozidel. V dalším kroku bude vybrána konkrétní trať, na niž dojde k porovnání mezi hodnotami získanými z dotazníku a skutečnými parametry dané infrastruktury. Výsledkem tohoto postupu bude rozdělení posuzovaných tratí do dvou skupin, tratě určené k elektrizaci a tratě vhodné pro nasazení vozidel typu BEMU. Současně bude možné prověřit i vhodnost umístění zařízení pro obnovu energie v akumulátorech.

Je třeba zdůraznit, že navrhovaný rozhodovací mechanismus nemá ambici jednoznačně určit, že na dané trati musí být provozovány akumulátorové jednotky nebo vozidla závislé trakce. Jeho úkolem je spíše naznačit, jaký dopravní koncept by mohl být v konkrétním regionu nejvhodnější a jaké podmínky je třeba při dalším rozhodování zohlednit.

4. Závěr

Článek se zabývá problematikou volby vhodného způsobu zajištění provozu železniční dopravy na neelektrizovaných regionálních tratích, srovnávající klasickou elektrizaci a provoz akumulátorových jednotek (BEMU – battery electric multiple unit). Nejprve je shrnuta aktuální problematika náhrady fosilních paliv na železnici. Ze současných projektů a legislativních koncepcí

vyplývá, že elektrizace je vhodná především pro významnější tratě s vyšší intenzitou osobní i nákladní dopravy. Pro regionální tratě s nižší frekvencí spojů se naopak jeví efektivnější nasazení BEMU, které nevyžaduje rozsáhlé investice do trakční infrastruktury a umožňuje flexibilní provoz.

Dále je popsáno dotazníkové šetření, které sloužilo jako zdroj dat pro vytvoření rozhodovacího mechanismu určujícího vhodnost tratě pro provoz akumulátorových vozidel. Šetření mezi odborníky ukázalo, že klíčovými faktory při rozhodování jsou provozní charakter trati, intenzita osobní a nákladní dopravy, význam tratě pro regionální obsluhu a dostupnost nabíjecí infrastruktury. Respondenti dále hodnotili cestovní dobu, geometrické parametry tratě a traťovou třídu zatížení. Výsledky ukázaly, že pro běžné regionální linky je akceptovatelná denní doba dojížděky do 60 minut, s preferencí spíše v rozmezí 40 až 50 minut.

V druhé části dotazníku respondenti stanovovali váhy jednotlivých kritérií metodou AHP (Saatyho metoda). Potvrdilo se, že největší význam má provoz (intenzita dopravy a charakter provozu), následovaný významem tratě a vybaveností. Infrastruktura má naopak relativně nižší váhu. Tento přístup umožňuje systematické zhodnocení konkrétních tratí a podporuje objektivní rozhodování mezi elektrizací a provozem BEMU s ohledem na technické, ekonomické a environmentální aspekty. Následně byl částečně znázorněn další postup se zpracováním získaných podkladů.

Celkově článek ukazuje, že kombinace rešerše, poznatků z pilotních provozů a expertního hodnocení poskytuje robustní základ pro tvorbu rozhodovacích nástrojů, které umožní efektivní plánování udržitelné regionální železniční dopravy s optimalizovanými investicemi.

Literatura

- [1] JACURA, Martin, ČÍŽEK, Jiří, KREJČÍ, Jiří, TREŠL, Ondřej: Bezemisní dálková železniční doprava v ČR v kontextu koncepce rozvoje elektrické trakce v ČR. Praha, 2024, Neveřejný dokument, Posuzovací dílo, zhotovitel ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Katedra dopravního inženýrství a dopravního plánování Konviktská 20, 110 00 Praha 1, objednatel ACRI, Pobřežní 224/20 186 00 Praha 8
- [2] ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA (HYTEP), z.s.: Základní informace k vodíku. Webová stránka. [cit. 2025-08-08], Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [3] 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. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/108985>
- [4] ŠRÁMEK, Michal: Dvouzdrojová vozidla, jejich provoz a infrastruktura. 2024. Technický článek, dráha, 11/2024, p. 14-19), ISSN 1211-1260
- [5] KREJČÍ, Jiří: Parametry ovlivňující elektrizaci tratí v souvislosti s nasazením vozidel s akumulátorem. Praha, 2024. Sborník příspěvků konference ŽELVA 2024 – 2. vydání, Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební), p. 95-109), ISBN 978-80-01-07397-1. Stať ve sborníku. Dostupné z: https://konferencazelva.cz/soubory/SBORNIK_final_ZELVA_2024_2vydani.pdf

Rychlost nákladních vlaků v kolejových spojeních a rozvětveních

Ing. Matouš Horák¹, Ing. Martin Kuchár², Tomáš Wapiennik³

*Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology
Veveří 331/95, 602 00 Brno*

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

e-mail_2: Martin.Kuchar1@vut.cz,

e-mail_3: 227162@vutbr.cz

Abstrakt

Článek pojednává o problematice rychlosti nákladních vlaků a jejím měření. Článek je součástí širší práce v této oblasti, doposud byla pozornost věnována převážně osobním vlakům. Čtenář bude seznámen s postupem měření a budou mu vysvětleny obtíže při zpracování a jejich řešení. Na přímou formu měření navazuje ověření dat v simulačním programu.

Klíčová slova

Rychlost, zrychlení, třídící nádražní, vjezdová skupina, neutrální pole, simulace.

Speeds of freight trains in rail connections and junctions

Abstract

This paper examines the measurement of freight train speeds as part of a broader study previously focused on passenger services. It outlines the applied methodology, highlights the main challenges encountered during data collection and processing, and presents the approaches adopted to address them. The direct measurements are further supported by validation through simulation.

Keywords

Speed, acceleration, marshalling yard, receiving yard, neutral section.

1. Úvod

Správce infrastruktury se dlouhodobě snaží o vkládání výhybek s co nejvyšší povolenou rychlostí v odbočné větvi do staničních zhlaví [1]. Praktická využitelnost těchto rychlostí v běžném provozu je však sporná. Na jedné straně mohou omezení daná zrychlením a brzděním vlaků v kombinaci s vlastnostmi infrastruktury vést ke snížení propustnosti staničních zhlaví a tím i celé tratě. Na straně druhé může zavedení výhybek na vyšší rychlosti, jejichž potenciál často nelze plně využít, znamenat zvýšené náklady na kolejový svršek a prodloužení fyzické délky zhlaví bez prodloužení užitečných délek kolejí. Klíčovým prvkem je v tomto ohledu také role zabezpečovacího zařízení. V minulosti byla požadována jednotná rychlost pro celý obvod výhybek u hlavního návěstidla [2]. S nástupem evropského vlakového zabezpečovače ETCS se však otevírá možnost postupného rychlostního profilu v rámci staničního zhlaví.

2. Cíle práce

Hlavním cílem článku je sestavení křivek zrychlení a brzdění pro nákladní vlaky. Tento cíl je sledován dvojím způsobem: jednak prostřednictvím přímých měření, jednak simulačními výpočty v softwaru OpenTrack. První fáze výzkumu probíhá za využití ručního radaru, v dalších etapách budou použity pokročilejší metody, například stacionární systémy pro sledování rychlosti. V navazující části výzkumu bude provedeno srovnání mezi výsledky simulací a skutečnými měřeními akcelerace vlaků.

Výsledné rychlostní profily mají poskytnout podklady pro optimální návrh staničních zhlaví, zejména v rámci skupin seřaďovacích nádraží. Vyšší vjezdové a odjezdové rychlosti mohou zkrátit dobu obsazení zhlaví a tím přispět ke zvýšení celkové kapacity.

3. Metodologie a předpoklady

3.1. Hmotnost a délka souprav

V předchozím článku se měřila rychlost osobních vlaků, jejichž složení je pevné a veřejně dostupné. Tyto údaje umožňují alespoň hrubý odhad hmotnosti vlaku, přičemž pro přesné vyhodnocení by bylo nutné zohlednit také hmotnost cestujících na základě průměrné obsazenosti. U nákladních vlaků však takové informace obvykle nejsou veřejně přístupné. Hmotnost vlaku je přitom klíčovým parametrem ovlivňujícím zrychlení, zatímco délka vlaku má zásadní vliv na dobu obsazení zhlaví. Pro účely tohoto článku bylo možné zajistit sdělení údajů o hmotnosti a délce vlaků díky koordinaci s dispečerem z Centrálního dispečerského pracoviště Přerov (CDP Přerov).

Nejlehčí zaznamenaný vlak měl celkovou hmotnost 192 tun a byl veden elektrickou lokomotivou řady 363 s prázdnými vozy. Naopak nejtěžší změřený vlak vážil 2 224 tun a byl veden elektrickou lokomotivou řady 193; šlo o průběžný nákladní vlak převážející hutní produkty. Většina pozorovaných

vlaků byla vedena v kategorii průběžný nákladní vlak (Pn) s hmotností v rozmezí 1 000–2 000 tun. Nákladní vlaky byly vedeny těmito typy hnacích vozidel (Tab. 1):

Tab. 1 Hnací vozidla měřených vlaků

	Řadové označení lokomotivy
Elektrické lokomotivy s asynchronním pohonem	1216; 193; ET43
Elektrické lokomotivy se stejnosměrnými trakčními motory	363; 230
Dieselektrické lokomotivy	742.7

3.2. Výběr lokality

Dalším důležitým faktorem při realizaci měření byl výběr vhodné lokality. V souladu s cíli tohoto článku byla preferována místa v seřadovacích nádražích (u osobních vlaků pak odbočné stanice), přičemž byly zohledněny následující kritéria:

- Vlaky by se měly rozjíždět z nulové počáteční rychlosti, tedy je nutné vybrat stanice, v níž dochází k třídění (resp. jiným dopravním úkonům, např. přepřah hnacího vozidla nebo střídání strojvedoucích) u velkého procenta vlaků, což vyloučilo například uvažovanou lokalitu Přerov
- Zhlaví vjezdové a odjezdové skupiny by mělo umožňovat vyšší rychlost, aby rozjezdy nákladních vlaků nebyly limitovány stavem infrastruktury. Tato podmínka u výsledné lokality splněna nebyla, zhlaví je v současném stavu konstruováno na rychlost 40 km/h. Mezi další zvažované lokality patřila i žst. Česká Třebová, kde sice napojení třídícího nádraží je provedeno štíhlými výhybkami (pro rychlost 60, resp. 80 km/h v odbočné větvi), nicméně napojení se nachází v odbočkách Zádulka a Parník, které jsou od samotného zhlaví značně vzdálené, samotné zhlaví je opět zkonstruované na rychlost 40 km/h
- Lokalita by měla ležet na trati s významným nákladním provozem. Jelikož současná metoda vyžaduje přítomnost obsluhy pro měření ručním radarem, je výhodné zvolit místo s vysokou četností vlaků, aby byla maximalizována efektivita sběru dat.

Na základě uvedených kritérií byla pro výzkum vybrána stanice Břeclav – přednádraží, konkrétně staniční zhlaví Hrušky. Na tomto místě byla určena tři měřicí stanoviště, jak ukazuje Obr. 1, přičemž každé stanoviště obsahovalo pět individuálních měřicích bodů. Zvolená lokalita leží na II. tranzitním koridoru, který je silně zatížen nákladní dopravou, zejména ucelenými vlaky v relacích (Polsko –) Ostravsko – Rakousko.



Obr. 1 Schéma měřicích stanovišť [3].

Měření byla realizována v rámci šesti samostatných v následujících termínech: 5. 4. 2024; 8. 4. 2024; 24. 7. 2024; 14. 8. 2024; 7. 4. 2025; 28. 4. 2025. Objem naměřených dat ukazuje následující Tab. 2.

Tab. 2 Objem dat přímého měření

	Vjezd do Břeclavi [ks]	Výjezd z Břeclavi [ks]
Stanoviště č. 1	15	15
Stanoviště č. 2	6	4
Stanoviště č. 3	3	6

3.3. Přímé měření

Výchozí metodou bylo opět měření rychlosti ručním radarem. Přestože se v pozdějších fázích počítá s osazením stabilních měřičů, je nutné vybrat optimální místo pro jejich instalaci, a to právě pomocí měření ručním radarem [4].

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.

Vzdálenost měřicích bodů na jednotlivých lokalitách se liší podle několika parametrů:

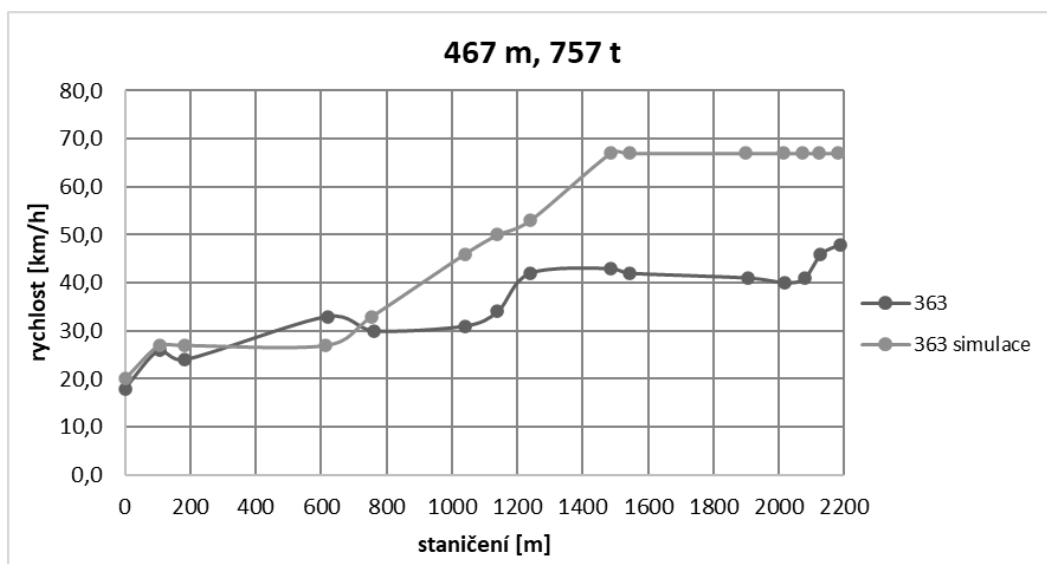
- Poloha měřicích míst (staniční zhlaví, rovná trať)
- Volba konkrétních měřicích bodů (pevné sloupy, části výhybek)
- Viditelnost jednotlivých měřicích bodů

V připojené tabulce (odkaz) jsou vybrané parametry měřených bodů.

Tab. 3 Porovnání vzdáleností a rychlostí měřících stanovišť

	Nejkratší změřená vzdálenost [m]	Nejdelší změřená vzdálenost [m]	Nejnižší změřená rychlost [km.h ⁻¹]	Nejvyšší změřená rychlost [km.h ⁻¹]
Stanoviště č. 1	20	160	16	100
Stanoviště č. 2	93	294	20	75
Stanoviště č. 3	27	137	40	74

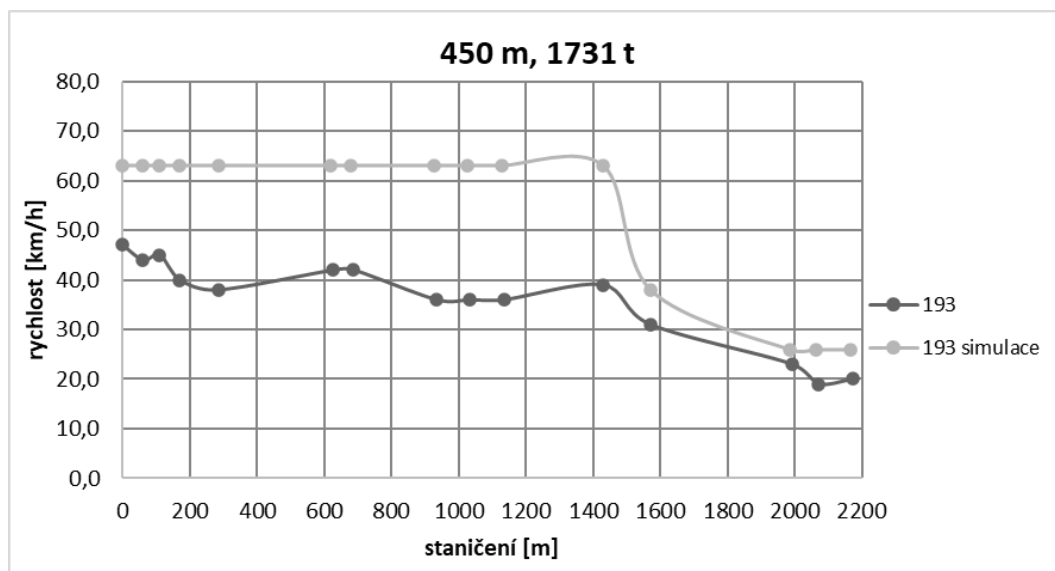
4. Výsledky



Obr. 2 Graf rozjezdu, hnací vozidlo řady 363, hmotnost soupravy 757 t.

Tab. 4 Rojezd, hnací vozidlo řady 363, hmotnost soupravy 757 t

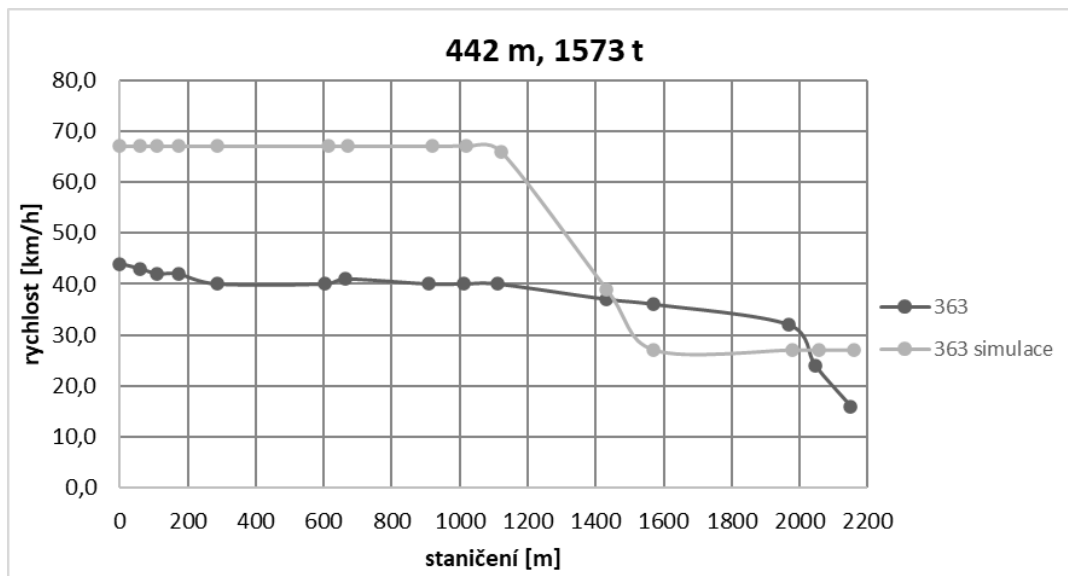
vzdálenost	[m]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
měření	[km/h]	18	24	27	33	29	30	39	45	41	41	40
simulace	[km/h]	20	27	27	27	35	44	52	64	67	67	67
absolutní rozdíl	[km/h]	2	3	0	-6	6	14	13	19	26	26	27
měření	[%]	90	89	100	122	83	68	75	70	61	61	60
simulace	[%]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
relativní rozdíl	[%]	10	11	0	-22	17	32	25	30	39	39	40



Obr. 3 Brzdění, hnací vozidlo řady 193, hmotnost soupravy 1731 t.

Tab. 5 Brzdění, hnací vozidlo řady 193, hmotnost soupravy 1731 t

vzdálenost	[m]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
měření	[km/h]	47	38	40	42	39	36	38	40	30	27	22
simulace	[km/h]	63	63	63	63	63	63	63	63	34	26	26
absolutní rozdíl	[km/h]	16	25	23	21	24	27	25	23	4	1	4
měření	[%]	75	60	63	67	62	57	60	63	88	96	85
simulace	[%]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
relativní rozdíl	[%]	25	40	37	33	38	43	40	37	12	4	15



Obr. 4 Brzdění, hnací vozidlo řady 363, hmotnost soupravy 1573 t.

Tab. 6 Brzdění, hnací vozidlo řady 363, hmotnost soupravy 1573 t

vzdálenost	[m]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
měření	[km/h]	44	42	38	40	41	40	40	37	36	39	29
simulace	[km/h]	67	67	67	67	67	67	62	42	27	27	27
absolutní rozdíl	[km/h]	23	25	29	27	26	27	22	5	-9	-12	-2
měření	[%]	66	63	57	60	61	60	65	88	133	144	107
simulace	[%]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
relativní rozdíl	[%]	34	37	43	40	39	40	35	12	-33	-44	-7

5. Diskuze

Pro porovnání byla stanovena jako referenční hodnota teoretická křivka vymodelovaná v simulačním programu a od ní byly stanoveny odchylky, relativní i absolutní (která je rozhodující při nízkých rychlostech).

Protože, na rozdíl od měření osobních vlaků, nelze změřit z jednoho měřicího stanoviště celý průběh rozjezdu, resp. Brzdění, bylo nezbytné pro výsledné porovnání složit celkový průběh z více měření. Pro celkový průběh byly vybrány vždy vlaky se stejným hnacím vozidlem a podobnou hmotností.

Z výsledků uvedených v předchozí kapitole jsou jasné rozpory mezi výsledky z přímého měření a ze simulace. Zatím co u osobních vlaků se jednalo v převážné míře jen o rozdíly kvantitativní, tj. příslušná teoretická křivka po vynásobení korekčním součinitelem věrně kopírovala naměřená data, v případě nákladních vlaků se navíc objevují i rozdíly kvalitativní – tj. průběh rozjezdů a brzdění je zcela odlišný od teoretické křivky, viz Obr. 2; Obr. 3 a Obr. 4.

V případě osobních vlaků se kvantitativní rozdíly pohybovaly v rozmezí 10-20 %, v případě nákladních vlaků dosahují až hodnot přes 40 % (této hodnoty dosahují i v oblasti nízkých rychlostí, což je ovšem dáno zkrácením, kdy i malá absolutní odchylka způsobí velkou relativní odchylku, např. Tab. 6).

K největším odchýlkám dochází ve střední části křivek, přibližně v oblasti 1000 metrů po rozjezdu z nulové rychlosti, popř. 1000 metrů před zastavením do nulové rychlosti.

6. Závěr

Z dílčích výsledků, publikovaných v kapitole 4 je patrné, že výsledky měření nákladních vlaků neumožňují použití simulace pro návrh zhlaví železničních stanic. Rozdíly jsou nejen kvantitativní, ale i kvalitativní, a neumožňují korekci pro lepší shodu s průběhem přímého měření. Reálné rezedy i brzdění vlaků je výrazně pozvolnější a ani jeho průběh nekopíruje teoretickou křivku. Výrazně problematictější je i průběh měření.

Literatura

- [1] SPRÁVA ŽELEZNIC. Technická specifikace nových výhybek a výhybkových konstrukcí soustav železničního svršku UIC 60 a S 49 2. generace. Praha, 2021.
- [2] SPRÁVA ŽELEZNIC. Dopravní a návěstní předpis pro tratě nevybavené evropským vlakovým zabezpečovačem. Praha, 2022.
- [3] SEZNAM.CZ, Mapa České republiky: 1:20 000. Online. Praha, 2024. Dostupné na: [https://mapy.cz/zakladni?vlastni-body&ut=Nový%20bod&ut=Nový%20bod&ut=Nový%20bod&uc=9nEIVxRXnO5085.Qgclg-h&ud=48°46%2713.378"N%2C%2016°54%2732.179"E&ud=48°46%2742.933"N%2C%2016°55%2711.846"E&ud=48°46%2747.823"N%2C%2016°55%2722.713"E&x=16.9154155&y=48.7763381&z=15](https://mapy.cz/zakladni?vlastni-body&ut=Nový%20bod&ut=Nový%20bod&ut=Nový%20bod&uc=9nEIVxRXnO5085.Qgclg-h&ud=48°46%2713.378)
- [4] HORÁK, Matouš a Martin KUCHÁR. Sborník příspěvků ŽELVA 2023. 5. ročník. Praha: Katedra železničních staveb, Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2023. ISBN ISBN 978-80-01-07244-8.

Vliv přesnosti lokalizace tramvaje na trati na benefity aktivního natáčení dvojkolí

Ing. Jan Vrba¹

Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice
e-mail_1: vrba@fs.cvut.cz

Abstrakt

Příspěvek představuje výzkum prováděný na Fakultě strojní ČVUT v Praze, zaměřený na integraci aktivních prvků do podvozku moderní nízkopodlažní kloubové tramvaje. Seznamuje čtenáře s technologií aktivního řízení dvojkolí v kolejových vozidlech a nastiňuje novou strategii řízení aktivních prvků v podvozku tramvaje s neotočnými podvozky. Studie se zabývá důležitou výzvou přesného určení polohy vozidla ve složitém městském prostředí, což je nezbytné pro efektivní řízení aktuátorů v podvozku tramvaje. Dále představuje výpočetní (MBS) model tramvaje spolu s modelem testovací trati odrážejícím skutečný segment pražské tramvajové sítě. Primárním cílem je vyhodnotit, jak přesnost lokalizace vozidla na trati ovlivňuje výhody aktivního vedení dvojkolí. Článek hodnotí prostřednictvím MBS simulací vliv na snížení opotřebení kol a kolejnic při porovnání provozu tramvaje s aktivním řízením dvojkolí na městské trati s přesným a nepřesným určováním polohy oproti základnímu stavu s pasivním odpružením. Výsledky ukazují, že i při značné nepřesnosti v určování polohy technologie aktivního řízení dvojkolí významně snižuje opotřebení kol a kolejnic.

Klíčová slova

Aktuátor, aktivní natáčení, podvozek, tramvaj, opotřebení, kontakt kolo – kolejnice, dvojkolí, lokalizace na trati.

Effect of tram on-track localization accuracy on the benefits of active wheelsets steering

Abstract

This paper explores research conducted at the Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague, focusing on the integration of active elements within the bogie of a modern low-floor articulated tram. It introduces readers to active wheelset steering technology in rolling stock and outlines a novel control strategy for active elements in the running gear of trams with non-rotating bogies. The study addresses the critical challenge of accurately determining the vehicle's position in complex urban settings, essential for effective actuator control in the tram's running gear. Additionally, it presents a Multibody Simulation (MBS) model of the tram alongside a test track model reflecting an actual segment of the Prague tramway network. The primary aim is to evaluate how vehicle positioning accuracy influences the advantages of active wheelsets guiding. Through MBS simulations comparing tram operation on an urban track with precise versus imprecise positioning against a baseline of passive suspension, the study assesses reductions in wheel and rail wear. The results show that even with significant positional uncertainty, active wheelset steering technology significantly reduces wheel and rail wear.

Keywords

Actuator, active steering, bogie, tram, wear, rail-wheel contact, wheelset, on-track localization.

1. Úvod

Vynález železničního dvojkolí a ocelové kolejnice lze považovat za jeden z nejzásadnějších technických vynálezů, který významně přispěl k rozvoji lidstva. Odvalování ocelového kola po ocelové kolejnici má ve srovnání s jinými druhy pozemní dopravy výrazně nižší valivý odpor. Kuželovitý nebo křivkový profil kol dvojkolí umožňuje sinusový pohyb v koleji, který napomáhá rovnoměrnému opotřebení kol, a díky tvaru jízdní plochy kol je dvojkolí schopno fungovat také jako přirozený diferenciál, což umožňuje vozidlu projíždět oblouky.

Na druhou stranu má vazba dvojkolí – kolej i své limity. Jedním z největších problémů je průjezd kolejových vozidel oblouky o malých poloměrech, kdy 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, emisím hluku a vibrací či zvýšeným ztrátám trakční energie. Opotřebení kol a kolejnic má za následek velké náklady jak pro správce infrastruktury, tak provozovatele vozidel, který musí zajistit soustružení (reprofilaci) opotřebovaného profilu kol a následně i výměnu kol, když je jejich průměr snížen na předepsané limitní hodnoty. Reprofilace kol, kterou je nutné pravidelně provádět kvůli opotřebení jejich jízdního profilu, a následná výměna celých kol či jejich obručí jsou jedním z největších nákladů při údržbě kolejových vozidel a zásadně se tak podílí na nákladech životního cyklu vozidla.

Tento problém je velmi patrný u městských kolejových vozidel, zejména tramvají, které obvykle jezdí na tratích vedoucích centry měst, kde se z prostorových důvodů často používají oblouky s velmi malými poloměry (méně než 25 metrů). Často také není možné před a za tyto oblouky zařadit přechodnici a křivost koleje se tak mění skokově, což je pro kolejová vozidla z hlediska opotřebení kol i komfortu jízdy pro cestující krajně nepříznivé. Oblouky s ještě menšími poloměry (kolem 15 metrů) se také často vyskytují ve vozovkách.

I přes mnohá především mechanická vylepšení, zejména v oblasti podvozků vozidel, se stále jedná o velmi aktuální problém. V posledních desetiletích se tak věnuje velká pozornost technologii aktivního natáčení dvojkolí, kdy jsou dvojkolí vozidla natáčena do oblouku aktivně řízenými silovými prvky (aktuátory). Natočením dvojkolí do oblouku se snižuje úhel náběhu, a tím i skluzové síly ve styku kola s kolejnicí, a nedochází tak k natolik velkému opotřebení kol a kolejnic.

Technologie aktivního vedení dvojkolí je zkoumána již několik desetiletí a navzdory dostatečně prokázaným přínosům této technologie na základě výpočtů a zkoušek na reálných vozidlech nebyla dosud nasazena v běžném provozu. Významný technologický pokrok však přináší nové možnosti v oblasti řízení i konstrukce akčních členů a v blízké budoucnosti lze očekávat další pokusy o nasazení této technologie v nových vozidlech. V poslední době jsou tyto snahy nejvíce patrné u systému aktivního řízení dvojkolí LiCAS společnosti Liebherr pro kolejová vozidla klasické železnice nebo u švýcarského start upu Traila s jeho konceptem aktivního řízení tramvajových jednonápravových podvozků. Podrobný přehled současného stavu využití aktivních prvků v kolejových vozidlech uvádí autor v [1].

Většina výzkumu využití aktivních prvků ke snížení opotřebení kol a kolejnic při průjezdu oblouky se týká konvenčních kolejových vozidel, ačkoli potenciál úspor při údržbě díky využití aktivních prvků je velmi významný i pro tramvajový provoz. Tramvajový provoz má však mnoho specifik oproti konvenční železnici a přístup k řízení aktivních prvků tak musí být jiný. Článek tak představuje autorem navržený koncept umístění a řízení aktivních prvků v podvozcích článkové tramvaje s neotočnými podvozky.

Tento článek představuje přístup k použití aktuátoru vyvinutého pro konvenční kolejová vozidla a jeho aplikaci do podvozku tramvaje. S ohledem na specifika provozu tramvají je navrženo odlišné řízení aktuátoru na základě

polohy vozidla na trati a digitální mapy trati. To vyvolává nové otázky ohledně požadavků na přesnost určení polohy vozidla na trati.

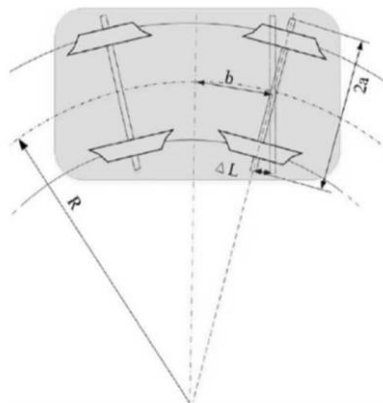
2. Navržený koncept řízení aktivních prvků

Vzhledem k tomu, že většina dosavadních návrhů řízení aktivních prvků v podvozku kolejového vozidla je koncipována pro konvenční železnici, je nejčastěji používáno zpětnovazební řízení aktuátorů na základě pohybů mezi podvozkem a skříní vozidla. Tento způsob řízení je však pro tramvaje nevhodný, jelikož většina současných tramvají využívá podvozky neotočné, které se natáčejí společně se skříní článku tramvaje. Pro tramvaje s neotočnými podvozky navíc technologie aktivního natáčení dvojkolí do oblouků může přinést výrazně vyšší snížení opotřebení než u tramvají s otočnými podvozky. Navíc ani u tramvají s otočnými podvozky není tento způsob řízení příliš vhodný, jelikož vzhledem k velmi malému poloměru a malé délce oblouků na tramvajových tratích a poměrně dlouhé době výsuvu aktuátoru, by aktuátor nestíhal dvojkolí dostatečně natočit a technologie by nebyla tolik přínosná jako u klasické železnice.

Pro aktivní natáčení dvojkolí tramvaje je tak uvažováno s dopředným řízením aktuátorů v podvozku vozidla. Jako vstupní veličiny algoritmu řídicího výsuvu aktuátorů slouží poloměr oblouku R , rychlost a poloha 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 Obrázek 1.

Vzhledem k malé délce oblouků, zejména těch s nejmenším poloměrem, byl algoritmus řízení nastaven tak, aby se dvojkolí před vjezdem do oblouku již začalo natáčet, a naopak se částečně rovnalo již před výjezdem z oblouku. Řízení dvojkolí bylo takto nastaveno na základě velkého počtu provedených simulací dle dosaženého celkového indexu opotřebení. Nastavení algoritmu řízení dvojkolí je podrobně popsáno v [2].

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

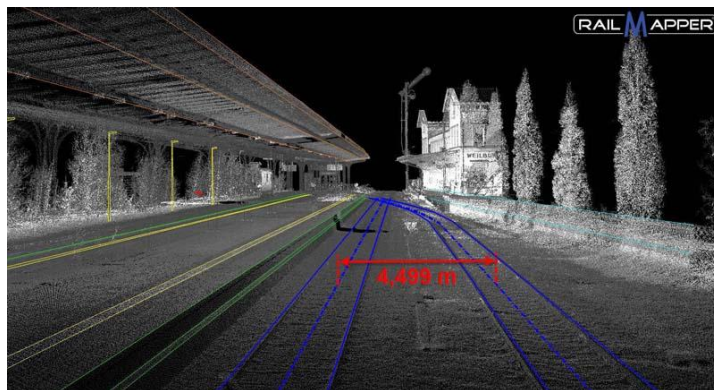


Obr. 1 Výpočet výsunu aktuátoru při průjezdu obloukem [3].

Rychlost vozidla je s dostatečnou přesností měřena již na dnešních vozidlech. Poloměr oblouku je pak na základě polohy vozidla na trati získáván z digitální mapy trati, která je nahrána ve vozidle. Digitální mapa trati obsahuje informace o jednotlivých úsecích projížděné trati a může být získána například speciálním měřicím zařízením (Obrázek 3 vlevo), kterým je trať projeta, a naměřená data jsou následně zpracována do databáze a nahrána do vozidla [4].

Informace o poloměru oblouku je tedy získávána na základě lokalizace vozidla na trati. Robustní a dostatečně přesná lokalizace je tedy pro takto navržené řízení aktivních prvků naprosto zásadní. Určení polohy vozidla na trati v městském prostředí s dostatečnou přesností však může být problematické. Tramvaj často projíždí centry měst s vysokou okolní zástavbou, vozidlo projíždí tunely nebo pod mosty. Dále se také městské prostředí, a tedy i okolí trati, velmi dynamicky mění, například na základě ročních období.

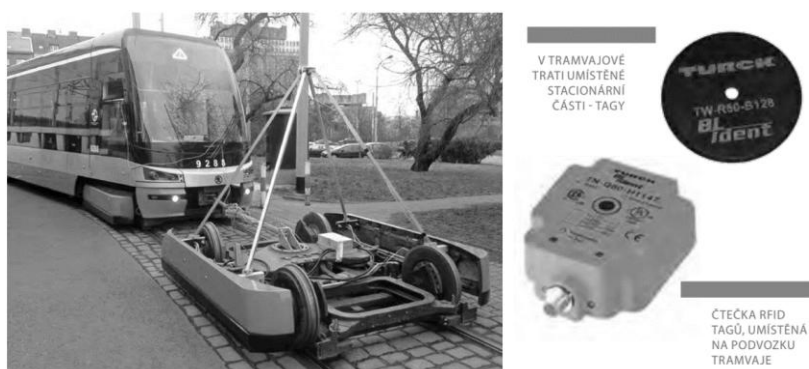
Z výše uvedeného lze předpokládat použití více zdrojů lokalizace vozidla na trati. Lze použít určování polohy na základě map s vysokým rozlišením (HD) v kombinaci s globálním navigačním satelitním systémem GNSS a odometrií. Tyto zdroje lze poté kombinovat pomocí Kalmanova filtru pro dosažení vyšší přesnosti a robustnosti lokalizace [5, 6].



Obr. 2 Příklad HD mapy železniční stanice [7].

Další možností může být využití technologie odometrie a radiofrekvenční identifikace (RFID) [4, 6].

Právě technologie radiofrekvenční identifikace, kdy je trať vybavena balízkami a vozidlo zařízením pro jejich čtení, se jeví jako dostatečně robustní, a navíc osvědčená metoda identifikace vozidel na trati v tramvajovém provozu. Tuto metodu používá například Dopravní podnik hlavního města Prahy (DPP) ve svém systému digitální mapy tratí EMA, který slouží k inteligentnímu řízení mazání okolků, hlášení zastávek nebo řízení rychlosti vozidel. Podle [4] je přesnost technologie EMA pro lokalizaci vozidel na trati ± 1 metr. Výhodou je, že tato přesnost není ovlivněna okolním prostředím jako například u GNSS, kde ve vysokých městských oblastech může být přesnost lokalizace vozidel výrazně snížena. Nevýhodou systému může být ekonomická náročnost vybavení a údržby trati takovými balízkami nebo bezpečnostní rizika při poruše čtečky či chybějících balízkách na trati.



Obr. 3 Tvorba digitální mapy trati (vlevo), štítek a čtečka technologie RFID (vpravo) [4].

3. MBS výpočet

Pro určení vlivu závislosti přesnosti lokalizace vozidla na benefity navrženého konceptu aktivního natáčení dvojkolí 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.

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

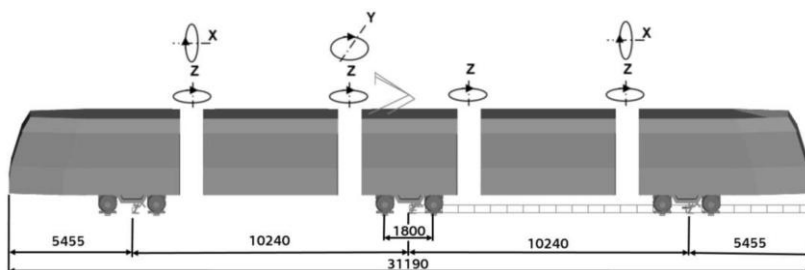
$$W = T_x \cdot v_x + T_y \cdot v_y \quad (2)$$

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

3.1. Model vozidla

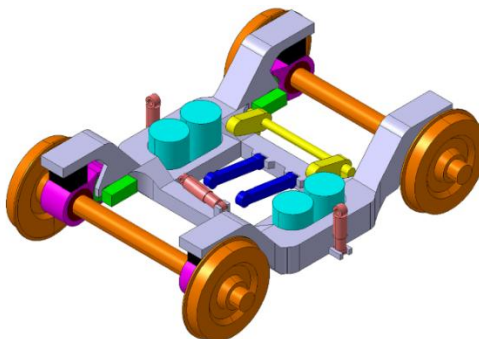
Pro ověření systému aktivního natáčení bylo vybráno vozidlo koncepce „multigelenk“ tedy vozidlo s pěti články a třemi neotočnými podvozky. Takováto koncepce tramvaje odpovídá nejčastějšímu řešení moderních článkových nízkopodlažních tramvají ve světě. Toto řešení tramvaje se také jeví jako nejvýhodnější pro aplikaci technologie aktivního natáčení, jelikož radiální stavění dvojkolí do oblouku může výrazně zlepšit problémy tohoto vozidla při průjezdu oblouky malých poloměrů a oblouků bez přechodnice, jako jsou velké příčné síly v kontaktu kolo – kolejnice, cuknutí celého článku tramvaje při vjezdu do oblouku bez přechodnice či výrazné 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 [8].



Obr. 4 MBS model vozidla.

Podvozek je řešen jako neotočný, avšak díky dorazům s progresivní charakteristikou je umožněno natočení podvozku oproti skříní vozidla o ± 2 stupně. Vedení dvojkolí je řešeno pomocí kyvného ramene. Aktuátor aktivně natáčející dvojkolí do oblouku je umístěn v kloubu spojovacím 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 [9, 10]. Primární vypružení je uvažováno pomocí pryžokovových pružin. Základní parametry vypružení jednotlivých částí podvozku jsou shrnuty v [8].

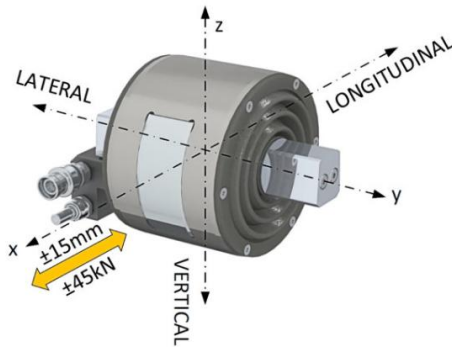


Obr. 5 Zjednodušený model podvozku pro MBS výpočty.

3.2. Použitý aktuátor

Jedním z důvodů, proč se většina výzkumu aktivního řízení dvojkolí zaměřuje na konvenční kolejová vozidla, je nepochybně velmi omezený prostor v podvozcích moderních nízkopodlažních tramvají. Společnost Liebherr však přišla s řešením aktivního silentbloku, který je umístěn v místě spojení kyvného ramene a rámu podvozku a aktivně řídí dvojkolí. Tento nově vyvinutý hydraulický aktuátor by mohl být potenciálně vhodný i pro tramvajová vozidla. Vzhledem k tomu, že aktuátor je vyvinut pro systém aktivního řízení dvojkolí pro konvenční kolejová vozidla je maximální výsuv aktuátoru ΔL_{max} pouze 15 mm a aktuátor je vždy umístěn pouze na jedné straně dvojkolí. Pro natáčení dvojkolí do oblouků s poloměry, které jsou běžné na konvenčních železničních tratích, je tato konfigurace umístění a maximálního vysunutí aktuátoru dostatečná. Pro efektivní použití v tramvajích se však takové natočení dvojkolí jeví jako nedostatečné.

LiCAS Actuator

**Actuator dimensions:**

190 mm	Diameter
130 mm	Width

Actuator movement:

± 15 mm	longitudinal
± 5 mm	lateral

Actuator force:

± 45 kN

Obr. 6 Aktivní silentblok Liebherr [10].

Pro navrhovaný koncept aktivního řízení dvojkolí kloubové tramvaje je tak uvažováno s aktuátory na obou stranách dvojkolí. Vzhledem k tomu, že tramvaje poměrně běžně projíždějí oblouky s poloměry okolo 20 metrů, bylo by podle vzorce (1) zapotřebí maximálního výsuvu aktuátoru $\Delta L_{max}=26,3 \text{ mm}$ na každé straně dvojkolí, aby dvojkolí projelo oblouk v radiální poloze s nulovým úhlem náběhu. Tato hodnota výsuvu aktuátoru však vyžaduje nejen nový vývoj aktivního silentbloku, ale také výrazně komplikuje mnoho dalších konstrukčních aspektů nízkopodlažního podvozku. Vyšší výsun aktuátoru a tedy i vyšší úhel natočení dvojkolí způsobuje komplikace v následujících oblastech:

- větší rozměry aktuátoru a jeho pohonu,
- složitá konstrukce primárního vypružení (vypružení musí být schopné výrazně vyšších podélných deformací),
- složitě řešení spojení mezi pohonem a dvojkolím,
- provozní bezpečnost - čím větší je maximální výsun aktuátoru, tím větší je riziko vykolejení vozidla nebo vážného poškození profilu kola v případě selhání ovládání aktuátoru,
- vyšší spotřeba energie aktuátoru.

Vzhledem k výše uvedeným argumentům bylo rozhodnuto použít pro simulace již vyvinutý aktuátor s $\Delta L_{max}=15 \text{ mm}$. Rychlost vysouvání aktuátoru je dle [10] uvažována 7 mm/s. Model aktuátoru nebyl pro dále prezentované simulace dále rozvíjen a bude vylepšen v dalších fázích výzkumu. Vzhledem ke zvolenému dopřednému řízení však lze předpokládat, že charakteristiky hydraulického aktuátoru a jeho napájení (dopravní zpoždění atd.) lze zahrnout do samotného řídicího algoritmu. Řídicí algoritmus aktuátoru tedy již zohlední dopravní zpoždění a začne otáčet dvojkolí s dostatečným předstihem.

3.3. MBS model trati

Aby bylo možné co nejpřesněji posoudit vliv přesnosti lokalizace vozidla na kolej při aktivním řízení dvojkolí v podvozku tramvaje, byl pro dynamické simulace vytvořen model reálné tramvajové trati. Vytvořená trať odpovídá skutečné tramvajové trati svým horizontálním i vertikálním profilem. Jako vhodná trať pro testování technologie aktivního řízení dvojkolí byla zvolena pražská tramvajová trať Václavské náměstí – Národní divadlo - Újezd - Sídliště Řepy. Tuto trať lze považovat za reprezentativní typickou tramvajovou trať, která spojuje periferii a centrum města a má vysoký požadavek na přepravní kapacitu. Většinu trati tvoří přímé úseky nebo úseky s oblouky s velkými poloměry, avšak zejména v centru města se vyskytují oblouky s velmi malými poloměry (R20) bez přechodnic, kde se křivost trati mění skokově.

Právě pro takovou trať se jeví vhodné použití vozidla zvolené koncepce „multi-gelenk“, pokud by takové vozidlo bylo schopno projíždět občasně oblouky s malým poloměrem bez zvýšeného opotřebením kol a kolejnic.

Horizontální a vertikální profil trati byl vytvořen v softwaru Simpack na základě stavebních výkresů získaných od Dopravního podniku hlavního města Prahy (DPP). Délka úseku pro prováděné simulace činí 10 641 m. Tento úsek trati odpovídá přibližně 60 % délky linky č. 9, jedné z nejvytíženějších tramvajových linek v Praze. Detailní rozbor horizontálního profilu trati obsahuje [8].

3.4. Okrajové podmínky pro MBS výpočty

Na základě předchozího výzkumu autora [8] bylo zjištěno, že největší vliv na snížení opotřebením kol a kolejnic má hodnota součinitele tření mezi kolem a kolejnicí. Simulace jsou proto provedeny pro hodnotu součinitele tření 0,4, což odpovídá suchým a neznečištěným kolejnicím. Simulace jsou dále provedeny pro provozně obsazené vozidlo, kdy jsou uvažováni všichni sedící cestující a 4 stojící cestující na m² (EL4). Při této volbě okrajových podmínek se nejlépe projeví rozdíly v indexu opotřebením při nepřesné lokalizaci vozidla.

Simulace byly provedeny pro vozidlo projíždějící po trati dvěma různými rychlostními profily - průjezd vozidla konstantní rychlostí 15 km/h a poté rychlostí odpovídající nevykompenzovanému příčnému zrychlení 1 m/s² případně maximální rychlosti vozidla 70 km/h.

Simulace byly dále provedeny se žlábkovou kolejnicí s profilem NT1 a profilem kola odpovídajícím profilu používanému DPP. Nerovnosti koleje nebyly pro výpočty zohledněny, stejně jako vliv pohonu vozidla.

4. Dosažené výsledky

Simulace jízdy tramvaje na prezentovaném traťovém úseku byly provedeny nejprve s pasivním vypružením a dvojkolí tak nebylo nikterak aktivně natáčeno. Výsledky získané simulací jízdy vozidla s pasivním i aktivním vedením dvojkolí byly porovnány na základě naměřených hodnot celkového čísla opotřebení a energie disipované v kontaktu kola a kolejnice u všech kol tramvaje. U provedených simulací s aktivním natáčením dvojkolí byla trať nejprve několikrát projeta s určováním přesné polohy vozidla na trati. Dvojkolí tak byla natočena v optimálním okamžiku, aby se minimalizovalo opotřebení kol a kolejnic.

Jízda vozidla byla poté opakována a pokaždé byla po celou dobu jízdy vozidla připočtena hodnota nepřesnosti lokalizace. Aktuátory se tak dříve či naopak později vysouvaly a dvojkolí bylo natáčeno mimo optimální moment před vjezdem do oblouku.

Simulace byly vždy provedeny pro 2 různé rychlostní profily a kladné a záporné hodnoty chyby lokalizace. Kladná hodnota chyby znamená, že řízení aktuátoru pracuje s polohou vozidla posunutou dopředu po směru jízdy vozidla oproti skutečné poloze na trati, zatímco záporná hodnota indikuje polohu vozidla posunutou po trati zpět.

Tabulka 1 ukazuje hodnoty čísla opotřebení a ztrátové energie v kontaktu kola a kolejnice získané z provedených MBS simulací. Každý řádek tabulky představuje průměrnou hodnotu na základě 4 simulací jízdy vozidla po trati (\pm chyba lokalizace, 2 různé rychlostní profily).

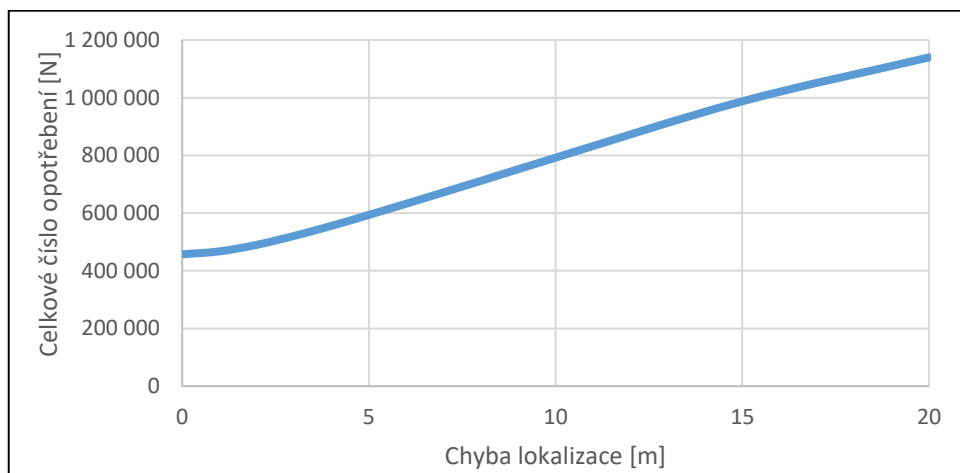
Simulace řízení vozidla s aktivním a pasivním řízením dvojkolí ukazují vysoký přínos ve snižování opotřebení kol a kolejnic, přičemž bylo dosaženo 65,3% snížení čísla opotřebení s nulovou odchylkou v lokalizaci vozidla oproti jízdě pouze s pasivním vypružením.

Při simulaci chyby určení polohy vozidla na koleji byly získány překvapivě pozitivní výsledky. Nepřesnost lokalizace 1 metr zhoršuje opotřebení kol pouze o méně než jedno procento. Při chybě lokalizace 5 metrů je pak zhoršení kolem deseti procent. I s posunutím informací o poloze vozidla pro ovládání aktuátorů o 20 metrů ve srovnání se skutečnou polohou vozidla došlo stále k mírnému zlepšení celkového čísla opotřebení oproti jízdě vozidla s konvenčním vypružením.

Tab. 1 Výsledky simulací jízdy vozidla na trati v závislosti na přesnosti určování polohy vozidla

Chyba lokalizace vozidla	Průměrné číslo opotřebení [N]	To je % oproti pasivnímu vedení	Průměr disipované energie [J]	To je % oproti pasivnímu vedení
±0	457 167	34.7	2 065 343	30.0
±1	467 295	35.5	2 133 174	31.0
±2	490 013	37.2	2 242 867	32.6
±3	520 979	39.5	2 394 941	34.8
±4	555 779	42.2	2 576 104	37.4
±5	593 595	45.1	2 757 182	40.1
±6	632 454	48.0	2 927 480	42.5
±8	711 572	54.0	3 351 308	48.7
±10	791 988	60.1	3 757 187	54.6
±15	987 417	74.9	4 751 485	69.1
±20	1 139 679	86.5	5 492 419	79.8

Z grafu na obrázku 7 je patrné, že při velmi malých nepřesnostech lokalizace je nárůst čísla opotřebení přibližně exponenciální a od nepřesnosti lokalizace 2 metrů výše se zvyšuje téměř lineárně.



Obr. 7 Celkové číslo opotřebení v závislosti na nepřesnosti lokalizace vozidla na trati.

5. Závěr

Článek se zabývá výzkumem aktivního řízení dvojkolí pro moderní kloubové tramvaje. Navrhuje použití již vyvinutého aktuátoru pro konvenční kolejová vozidla a také nový model dopředného řízení aktuátorů v podvozku vozidla vzhledem ke specifikám tramvajového provozu. Vzhledem k navrhovanému konceptu řízení je klíčové správně určit polohu vozidla na trati, aby aktuátory mohly začít natáčet dvojkolí ve správný okamžik před obloukem. Z tohoto důvodu byly provedeny MBS simulace jízdy vozidla s aktivním a pasivním řízením dvojkolí na traťovém úseku pražské tramvajové sítě při různých rychlostech vozidla.

Nejprve byla provedena simulace jízdy vozidla s pasivním a poté s aktivním řízením dvojkolí, kde byla poloha vozidla, jako vstup do řídicího systému aktuátorů, určena bez odchylky. V tomto srovnání dosáhlo vozidlo s aktivně vedeným dvojkolím snížení celkového čísla opotřebení, které odráží opotřebení kol a kolejnic, o více než 65 %.

Následně byly provedeny simulace s aktivním řízením dvojkolím, avšak do řízení akčních členů byla přidána odchylka od skutečné polohy tramvaje na koleji. Aktuátory tak natáčely dvojkolí dříve nebo později, než by bylo vhodné. Pokud je chyba lokalizace ve směru jízdy vozidla, ukazuje se, že i výrazně nižší natočení dvojkolí než optimální hodnota stále významně pomáhá snížit opotřebení kol a kolejnic při vjezdu do oblouku, kdy je opotřebení nejvyšší.

Pokud je odchylka v opačném směru, než je směr jízdy, dvojkolí se natočí dříve. Vozidlo tak vjíždí do oblouku s dvojkolím již natočenými více než optimálně. To výrazně snižuje opotřebení při vjezdu do oblouku. Na druhou stranu se opotřebení zvyšuje před vjezdem do oblouku a před výjezdem z oblouku.

Jak ukazují výsledky prezentované v kapitole 4, aktivní systém řízení dvojkolí vykazoval relativně nízkou citlivost na nepřesnost lokalizace vozidla na trati.

Dalším důvodem malého vlivu přesnosti určení polohy vozidla je relativně pomalá rychlost vysouvání aktuátoru. Dále je třeba zohlednit malé hodnoty natočení dvojkolí, kde ani při dřívějším nebo pozdějším natočení nedochází k výraznému zvýšení opotřebení u oblouků s větším poloměrem. Je třeba též vzít v úvahu, že zkušební úsek trati se skládá převážně z oblouků s větším poloměrem a s přechodnicemi, a proto je citlivost na nepřesnost řízení dvojkolí nižší než u oblouků s malým poloměrem a bez přechodnic. Čím více ostrých oblouků má trať, tím důležitější bude přesnost určení polohy vozidla.

Aktivní řízení lze tedy ovládat pomocí traťových balíz a odometrických měření na vozidle, jak je uvedeno v kapitole 2. Přesnost

této lokalizace vozidla je kolem 1 metru [4] a nezávisí na okolním prostředí. Další výhodou tohoto principu je, že by se jednalo pouze o rozšíření stávajícího systému o novou funkci.

Ačkoli se metoda traťových balíz jeví jako nejvhodnější, lze si představit i jiné metody lokalizace, jako je kombinace GNSS s odometrií a HD mapováním. Při použití této metody lokalizace lze očekávat horší výsledky, nicméně, jak ukazují provedené simulace, opotřebení kol a kolejnic bude stále výrazně sníženo.

Vzhledem k bezpečnostním rizikům a riziku zvýšeného opotřebení kol a kolejnic v případě nesprávné hodnoty vstupní veličiny (poloměr oblouku) pro algoritmus řízení aktuátorů je však vhodné tuto proměnnou ověřit z několika nezávislých zdrojů. Tento přístup se již dlouho používá například v leteckém průmyslu. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodné, aby byl poloměr nadcházejícího oblouku ověřován pomocí senzorů na přední části vozidla (LiDAR, kamera). Řídicí systém bude schopen detekovat kolejnice a vypočítat poloměr oblouku. Takto získaný poloměr oblouku bude poté porovnán s hodnotou v databázi tratě a pokud se hodnoty významně neshodují, nedojde k natočení dvojkolí a vozidlo bude úsek projíždět sníženou rychlostí s aktuátory v nominální poloze. Lze předpokládat, že výše zmíněné senzory na přední části vozidla budou na vozidle umístěny primárně pro jiný účel (např. antikolizní systém), a nezvýší tak cenu systému aktivního natáčení dvojkolí. Tato technologie je již dnes k dispozici a je nasazena například v nových tramvajích Škoda 52T pro Prahu.

Navrhovaná metoda využití aktivního řízení tramvajových dvojkolí má tak velký potenciál snížit opotřebení kol a kolejnic, snížit spotřebu trakční energie nebo výrazně snížit hluk a vibrace z tramvajové dopravy a tím přispět k dalšímu rozvoji tramvajové dopravy.

Literatura

- [1] VRBA, J. and J. KOLÁŘ. Možnosti aplikace aktivních prvků v kolejových vozidlech. *Nová železniční technika*. 2022, 2022(4), 24-32. ISSN 1210-3942
- [2] VRBA, J. Optimalizace algoritmu aktivního natáčení dvojkolí kloubové tramvaje v obloucích s velmi malými poloměry. In: *Sborník příspěvků konference ŽELVA 2024. ŽELVA 2024 - Studentská vědecká konference Železniční výzkumné aktivity, Praha, 2024-09-10. Praha: ČVUT, 2024. p. 1-88. ISBN 978-80-01-07332-2. Dostupné z: https://konferencazelva.cz/soubory/SBORNIK_final_ZELVA_2024.pdf*
- [3] BIN, F., BRUNI, S. (2020): Fault-tolerant design and evaluation for a railway bogie active steering system, In: *Vehicle System Dynamics*. 2020, DOI:10.1080/00423114.2020.1838563

- [4] HORŇÁK, R. EMA umí mazat či omezit rychlost. DP Kontakt. 2018(1), 12-14.
- [5] 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.
- [6] 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, 21(10) [cit. 2024-03-21]. ISSN 1424-8220. DOI:10.3390/s21103452
- [7] RailMapper. IGI - INTEGRATED GEOSPATIAL IN-NOVATIONS [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://www.igi-systems.com/railmapper.html>
- [8] VRBA, J. Reduction of wheel and rail wear by application of actuators in the primary suspension of an articulated tram. In: NIEßEN, N. and Ch. SCHINDLER, eds. IRSA 2023 : Tagungsband/proceedings: Aachen, Germany 22-23 November 2023. Hamburg: DVV Media group Eurailpress, Hamburg, 2024. p. 248-263. DOI 10.18154/RWTH-2024-00257. Dostupné z: <https://publications.rwth-aachen.de/record/976473/files/976473.pdf>
- [9] LiCAS passes test successfully [online]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/latest-news/news-press-releases/detail/licas-passes-test-successfully.html>.
- [10] Electrohydraulic Controlled Axle Steering (eCAS) [online]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/transportation/downloads/products/liebherr-electrohydraulic-controlled-axle-steering-ecas.pdf>

Poděkování

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

Název: Sborník příspěvků konference ŽELVA 2025

Editor: Ing. Petra Váňová

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
2025

Zpracovala: Fakulta stavební
Katedra železničních staveb
Thákurova 7, Praha 6 – Dejvice, 166 29
(+420) 224 354 689

ISBN: 978-80-01-07468-8

Vydání: první

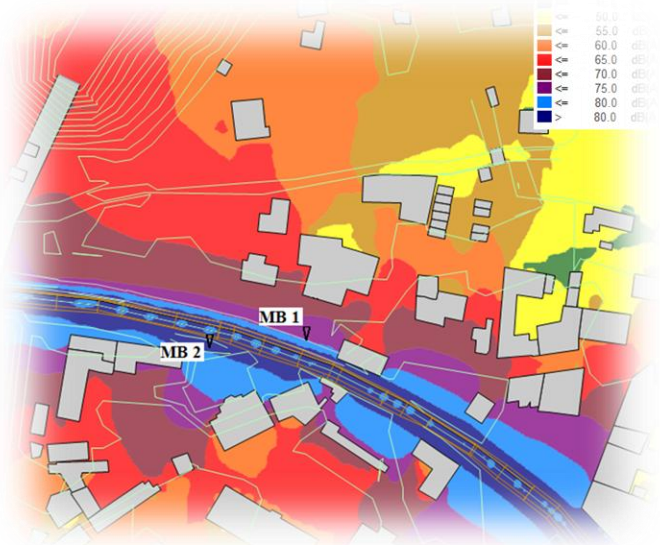
Počet stran: 82



KATEDRA
ŽELEZNIČNÍCH STAVEB
FAKULTA STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE



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



(+420) 224 354 689
K137@fsv.cvut.cz

**KATEDRA
ŽELEZNIČNÍCH STAVEB**

Thákurova 2077/7
Praha 6 – Dejvice
166 29



ISBN 978-80-01-07468-8