

NÁVRH ÚPRAVY METODIKY VÝPOČTU VOZIDLOVÉHO ODPORU KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

PROPOSAL OF A MODIFICATION OF METHOD FOR CONTAINER TRAIN RESISTANCE CALCULATION

Tomáš MICHÁLEK¹, Petr ŠIMRAL²

Abstrakt

Předmětem tohoto příspěvku je návrh úpravy stávající metodiky, která se používá pro výpočet vozidlového odporu nákladních vlaků v podmínkách SŽDC, a to se zaměřením na kontejnerové vlaky. Navrhovaná úprava vychází z hodnocení série výběhových zkoušek, které byly v rámci běžného provozu realizovány s kontejnerovými vlaky společnosti METRANS Rail v letech 2013 až 2016 na trati Brno–Břeclav. Kromě dvou různých přístupů k hodnocení získaných dat je zde ukázáno, jak se navržená úprava projeví v zátěžových tabulkách, resp. při stanovování technických normativů zátěže. Pozornost je věnována též využitelnosti metodiky v podmínkách provozu kontejnerových vlaků v tunelech.

Klíčová slova

vozidlový odpor, kontejnerový vlak, výběhová zkouška, zátěžová tabulka, tunelový faktor, trakční mechanika

Abstract

The aim of this paper is to propose a modification of the current method for estimation of the train resistance of container trains which is used in conditions of the Czech railway infrastructure manager (SŽDC). The proposed modification is based on results of evaluation of a set of run-down tests which were realized with container trains of the METRANS Rail company in 2013 to 2016 on the railway line Brno–Břeclav. An influence of the proposed modification on load tables and permitted train mass as well as two different approaches to evaluation of the run-down tests are demonstrated in the paper. The attention is also paid to a usability of the modified method in conditions of train operation in railway tunnels.

Keywords

train resistance, container train, run-down test, load table, tunnel factor, traction mechanics

1 ÚVOD

Provozní zkušenosti z posledních přibližně deseti let ukazují, že existuje určitý nesoulad mezi technickými normativy hmotnosti, jež jsou stanoveny správcem infrastruktury (SŽDC), a skutečnými možnostmi, které stávající železniční technika poskytuje. Tedy že moderní lokomotiva dokáže na kvalitní koridorové trati odvézt za jinak nezměněných podmínek nezanedbatelně těžší vlak, než

¹ Ing. Tomáš Michálek, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 428, e-mail: tomas.michalek@upce.cz

² Petr Šimral, METRANS Rail s.r.o. Podleská 926/5, 104 00 Praha 10 – Uhřetíněves. Tel.: +420 267 293 591, e-mail: simral@metransrail.eu

kolik předpokládají technické normativy, jejichž výpočet je založen na aplikaci empirických vzorců, které charakterizují měrný vozidlový odpor vlaku a které mají svůj původ v hodnocení souboru výběhových zkoušek určitých typů nákladních vozů, realizovaných v roce 1991 (tedy již před více než čtvrtstoletím) na železničním zkušebním okruhu v Cerhenicích. Důvody, proč tomu tak je (tedy především klidnější jízda vozidel na tratích s kvalitním železničním svrškem a stále rozšířenější používání nekovových brzdových špalíků snižujících drsnost povrchu kol, ale i fyzikálně nekorektní zacházení s aerodynamickou složkou vozidlového odporu při aplikaci měrných jízdních odporů) jsou shrnuty v příspěvku [1], jenž byl na této konferenci prezentován před 4 lety. V příspěvku [1] proto byla jako jedno z možných řešení uvedeného problému navržena úprava metodiky výpočtu vozidlového odporu, podle níž by byl absolutní vozidlový odpor vlaku O_v definován pomocí vztahu:

$$O_v = o_{val} \cdot G_v + O_{aer}, \quad (1)$$

kde veličina o_{val} je udávána v [N/kN] a vyjadřuje v měrném tvaru ty složky vozidlového odporu, které jsou prakticky nezávislé na rychlosti jízdy (tedy zejména odpor z valení a odpor v ložiskách, ale také např. vliv nedokonale odlehklých brzdových špalíků apod.), G_v je tíha vlaku v [kN] a O_{aer} je aerodynamická složka vozidlového odporu v [N]. V principu jde tedy o poměrně zásadní změnu v metodice výpočtu vozidlového odporu, kdy je aerodynamická složka odporu vyčleněna z měrného vyjádření, a tudíž se stává nezávislou na tíze, resp. hmotnosti vlaku.

Tento příspěvek tak volně navazuje na práci prezentovanou v článku [1] a zabývá se návrhem metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků, která respektuje navrženou podobu rovnice (1), a dále také důsledky navržené změny. Stanovení koeficientů definujících novou rovnici vozidlového odporu vychází z výsledků hodnocení série výběhových zkoušek, jež byly realizovány v rámci běžného provozu s kontejnerovými vlaky dopravce METRANS Rail v úseku I. železničního koridoru mezi stanicemi Brno a Břeclav v letech 2013 a 2016.

2 PROVOZNÍ VÝBĚHOVÉ ZKOUŠKY A JEJICH VYHODNOCENÍ

S cílem ověřit hypotézu o přílišné konzervativnosti stávajících vzorců vozidlového odporu (jde především o měrné vozidlové odpory kategorií „U4“, „S“ a „T4“ používané pro kontejnerové vlaky; viz [1, 2]) a též získat potřebná data byla s běžnými kontejnerovými vlaky dopravce METRANS Rail provedena série tzv. *provozních výběhových zkoušek*. Šlo tedy o výběhy realizované ve zvoleném traťovém úseku v rámci možností daných aktuální provozní situací. Traťový úsek Brno–Břeclav byl vybrán z toho důvodu, že se zde nevyskytují velké hodnoty podélných sklonů ani oblouky o malých poloměrech, a tudíž je zde jízda vlaku traťovými odpory ovlivňována jen minimálně. Podrobnosti týkající se těchto zkoušek a postupu při jejich vyhodnocení jsou popsány v článku [3], a proto je zde uvedeno jen stručně shrnutí a dále je pozornost věnována praktickému využití získaných výsledků.



Obr. 1 Kontejnerový vlak společnosti METRANS Rail

Vlaky, se kterými byly výběhové zkoušky realizovány, byly sestaveny z elektrické lokomotivy ř. 189 (Siemens ES64F4), nebo 386 (Bombardier TRAXX F140 MS2e) a soupravy kontejnerových vozů různých typů a v různém stavu ložení. Převládajícími typy vozů zde byly čtyřnápravové vozy

Sggnss 80' a článkové šestinápravové vozy Sggrss 80' v omezené míře však byly v předmětných vlcích zastoupeny také vozy typů Sggrms 90' a Sgns 60'. Délka všech sledovaných vlaků se pohybovala kolem hodnoty 600 m; celková hmotnost vlaku bez lokomotivy se pohybovala přibližně v rozmezí 650 až 1600 t. Běžný kontejnerový vlak společnosti METRANS Rail s lokomotivou ř. 386 je znázorněn na obr. 1; parametry všech hodnocených vlaků jsou pak shrnuty v tab. 1, kde jsou kromě délky, hmotnosti a počtu náprav pro každý vlak uvedeny i odpovídající hodnoty průměrné hmotnosti na nápravu a tzv. počtu „nových čel“ ve vlaku. Tato veličina byla zavedena ve snaze o co nejjednodušší charakterizaci tvarové členitosti vlaku ve vztahu k jeho aerodynamice, přičemž se „novým čelem“ míní ty situace, kdy za prázdným kontejnerovým vozem (nebo skupinou prázdných vozů) následuje vůz ložený kontejnery (nebo skupina ložených vozů). Takto vzniklá mezera následovaná novou čelní plochou o velikosti čelní stěny kontejneru svým tvarovým součinitelem odporu vzduchu nezanedbatelně zvyšuje aerodynamickou složku vozidlového odporu celého vlaku. Přestože se mezi jednotlivými kontejnery, resp. mezi jednotlivými loženými vozy mohou vyskytovat i kratší mezery (nežli ty o minimální délce celého vozu), uvedená definice „nového čela“ v soupravě zde byla zavedena z důvodu její snadné dohledatelnosti, neboť jsou všechny potřebné informace uvedeny v soupisu vozů daného vlaku, tedy v běžné provozní dokumentaci.

Tab. 1 Parametry sledovaných kontejnerových vlaků vč. výsledků hodnocení provozních výběhových zkoušek (hodnoty uvedené v závorkách platí pro soupravy vlaků včetně lokomotivy)

Číslo vlaku, směr jízdy, skladba vlaku	Délka vlaku L_v [m]	Počet náprav N_n [1]	Hmotnost vlaku M_v [t]	Prům. hmotnost na nápravu M_n [t]	Počet „(nových) čel“ N_c [1]	Součinitel a [$N \cdot kN^{-1}$]	Součinitel C [$N \cdot h^2 \cdot km^{-2}$]
1 Brno→Břeclav ř.189 + 23 vozů	604,4 (624,0)	124 (128)	650 (737)	5,24 (5,76)	4 (5)	1,417 (1,414)	2,844 (3,051)
2 Brno→Břeclav ř.189 + 25 vozů	604,8 (624,4)	126 (130)	737 (824)	5,85 (6,34)	5 (6)	1,342 (1,332)	3,066 (3,242)
3 Břeclav→Brno ř.189 + 25 vozů	604,8 (624,4)	126 (130)	1519 (1606)	12,06 (12,35)	1 (2)	1,008 (1,039)	2,772 (2,962)
4 Brno→Břeclav ř.189 + 24 vozů	604,0 (623,6)	122 (126)	643 (730)	5,27 (5,79)	0 (1)	1,520 (1,477)	2,410 (2,643)
5 Břeclav→Brno ř.386 + 23 vozů	601,8 (620,7)	118 (122)	1234 (1318)	10,46 (10,80)	0 (1)	1,015 (1,067)	2,422 (2,587)
6 Brno→Břeclav ř.386 + 23 vozů	602,0 (620,9)	112 (116)	1259 (1343)	11,24 (11,58)	3 (4)	1,060 (1,113)	2,940 (3,109)
7 Brno→Břeclav ř.386 + 22 vozů	584,3 (603,2)	100 (104)	835 (919)	8,35 (8,84)	3 (4)	1,305 (1,347)	3,359 (3,534)
8 Břeclav→Brno ř.386 + 22 vozů	584,3 (603,2)	100 (104)	1592 (1676)	15,92 (16,12)	0 (1)	0,963 (1,009)	3,124 (3,272)
9 Brno→Břeclav ř.386 + 23 vozů	600,0 (618,9)	106 (110)	1195 (1279)	11,27 (11,63)	3 (4)	1,040 (1,065)	2,520 (2,722)

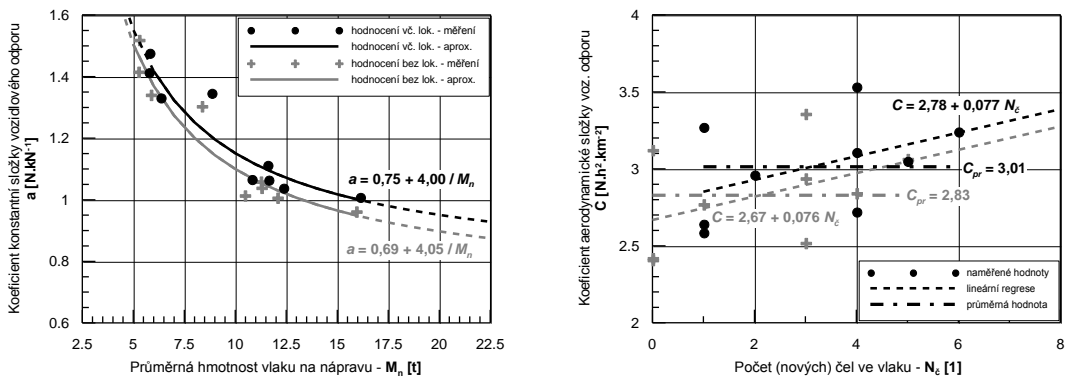
Samotné hodnocení výsledků zrealizovaných provozních výběhových zkoušek (viz článek [3]) bylo provedeno s využitím řešení pohybové rovnice vlaku, přičemž základním vstupem pro výpočet byl záznam rychlosti jízdy, pořízený s využitím zařízení GPS umístěného na lokomotivě, a detailní znalost traťových poměrů ve vyšetřovaném traťovém úseku.

3 NÁVRH ÚPRAVY METODIKY VÝPOČTU VOZIDLOVÉHO ODPORU

Výsledkem hodnocení provozních výběhových zkoušek je pro každý sledovaný vlak závislost vozidlového odporu O_v , udávaného v [N], na rychlosti jízdy V , udávané v [km/h], a to ve tvaru:

$$O_v = a \cdot M_v \cdot g + C \cdot V^2, \quad (2)$$

kde M_v je hmotnost vlaku v [t], a je koeficient na rychlosti nezávislé složky vozidlového odporu, udávaný v [N/kN], a C je koeficient aerodynamického odporu vlaku, udávaný v [N/(km/h)²]. Získané hodnoty koeficientů a a C jsou pro jednotlivé vyšetřované vlaky uvedeny v tab. 1. Zde jsou přitom vždy uvedeny dvě hodnoty. Jednak pro případ, že byla při hodnocení uvažována lokomotiva zvlášť (tzn., že je její vozidlový odpor definován jako samostatná charakteristika), a takto získaný popis vozidlového odporu je tudíž platný pro soupravu vozů bez lokomotivy. A jednak pro případ, že byl vlak uvažován jako jeden celek, charakterizovaný jedinou rovnicí vozidlového odporu, tedy včetně lokomotivy, což se projevuje mj. i mírně vyšší průměrnou hmotností na nápravu.



Obr. 2 Náhrada výsledků provedených provozních výběhových zkoušek funkčními závislostmi; vlevo: závislost koeficientu konstantní složky vozidlového odporu a na průměrné hmotnosti na nápravu; vpravo: závislost koeficientu aerodynamické složky vozidlového odporu C na počtu „(nových) čel“ ve vlaku. Šedou barvou jsou znázorněny výsledky charakterizující soupravu vozů; černou barvou výsledky pro celý vlak vč. lokomotivy.

Na obr. 2 jsou výsledky získané oběma způsoby hodnocení výběhových zkoušek (tj. pouze pro soupravu vozů a pro celý vlak včetně lokomotivy) prezentovány ve formě grafů. V levém grafu jsou uvedeny závislosti koeficientu a , představujícího měrný tvar konstantní složky vozidlového odporu, na průměrné hmotnosti soupravy vozů (resp. celého vlaku) na nápravu M_n , udávané v [t]. Tato závislost byla nalezena ve tvaru hyperboly, tedy obecně:

$$a = k_1 + \frac{k_2}{M_n}, \quad (3)$$

kde konstanty k_1 a k_2 nabývají v závislosti na způsobu hodnocení hodnot uvedených v tab. 2. Klesající (hyperbolickou) závislost koeficientu a na průměrné hmotnosti na nápravu lze vysvětlit tak, že na rychlosti nezávislá složka vozidlového odporu nezahrnuje pouze ty odpory, jejichž velikost je přímo úměrná hmotnosti vozidla (typicky odpor z valení a odpor v ložiskách; viz [2]), ale též takové odpory, jejichž velikost je na hmotnosti vozidla prakticky nezávislá (například odpor nedokonale odlehklých brzdových zdrží, který závisí na počtu náprav), a tudíž jsou tyto odpory u vlaků s nižším nápravovým zatížením relativně vyšší oproti vlakům s vyšším nápravovým zatížením.

Pravý graf na obr. 2 pak znázorňuje závislosti koeficientu C na počtu „(nových) čel“ ve vlaku, přičemž tato veličina může nabývat minimální hodnoty $N_c = 0$ při hodnocení soupravy vozů, resp. $N_c = 1$ při hodnocení vlaku jako celku včetně lokomotivy. V tomto grafu jsou zobrazeny jak hodnoty získané vyhodnocením jednotlivých zkoušek, tak příslušné průměrné hodnoty vypočtené ze všech

provedených měření (čerchovanou čarou) a zároveň trendy zachycující závislost koeficientu C na tomto počtu „(nových) čel“ N_c ve vlaku (čárkovanou čarou). Tyto trendy byly získány lineární regresí z jednotlivých hodnot ve tvaru:

$$C = k_3 + k_4 \cdot N_c, \quad (4)$$

kde konstanty k_3 a k_4 nabývají v závislosti na způsobu hodnocení hodnot uvedených v tab. 2, v níž jsou uvedeny i průměrné hodnoty C_{pr} a směrodatné odchylky σ_C . I přes značný rozptyl naměřených hodnot tak zjištěné trendy vypovídají o vlivu tvarové členitosti vlaku na jeho aerodynamický odpor.

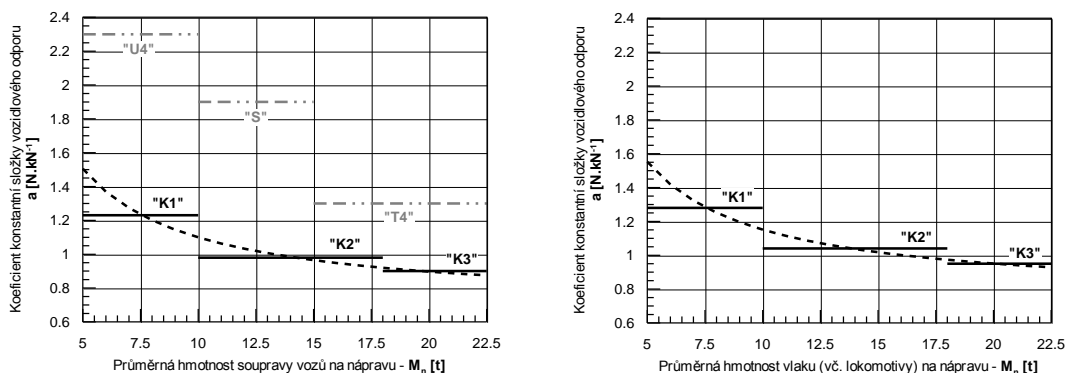
Tab. 2 Hodnoty konstant definujících závislosti koeficientů a a C v rovnici (2) na průměrné hmotnosti vlaku na nápravu, resp. na počtu „(nových) čel“ ve vlaku pro různé způsoby hodnocení výběhových zkoušek

Způsob hodnocení výsledků	konstanta k_1	konstanta k_2	konstanta k_3	konstanta k_4	prům. hodnota C_{pr}	směr. odchylka σ_C
Souprava vozů	0,69	4,05	2,67	0,076	2,83	0,33
Celý vlak (vč. lok.)	0,75	4,00	2,78	0,077	3,01	0,32

S ohledem na praktickou použitelnost získaných výsledků se jeví jako nezbytně nutné uvedené vztahy pro výpočet vozidlového odporu zjednodušit, neboť při plánování tras kontejnerových vlaků není přesně známá ani jejich průměrná hmotnost na nápravu, natož pak rozložení kontejnerů na jednotlivé vozy. Proto je zde navrženo jednak rozčlenění vlaků do kategorií dle průměrné hmotnosti na nápravu (obdobně jako je tomu v případě stávajících kategorií vozidlového odporu „U“, „S“ a „T“) a dále používání průměrné zjištěné hodnoty koeficientu aerodynamického odporu vlaku. Tyto nově navržené kategorie se opět liší průměrnou hmotností soupravy vozů, resp. vlaku na nápravu:

- kategorie „K1“ pro lehké vlaky s průměrnou hmotností 5 až 10 t na nápravu,
- kategorie „K2“ pro středně těžké vlaky s průměrnou hmotností 10 až 18 t na nápravu,
- kategorie „K3“ pro těžké vlaky s průměrnou hmotností 18 až 22,5 t na nápravu.

V grafech na obr. 3 je provedeno porovnání koeficientů a stanovených jednak pomocí vztahu (3) a jednak navrženou zjednodušenou metodou, kdy pro kategorii „K1“ je uvažována teoretická hodnota odpovídající průměrnému zatížení 7,5 t/n, pro „K2“ 14 t/n a pro „K3“ pak 20 t/n. Levý graf znázorňuje výsledky odpovídající samotné soupravě vozů (včetně porovnání s konstantním členem stávajících měrných vozidlových odporů kategorií „U4“, „S“ a „T4“), pravý graf výsledky pro vlak vč. lokomotivy. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tab. 3. Čárkovaně je na obr. 3 vyznačen teoretický průběh konstanty a dle vztahu (3) v závislosti na odpovídajícím průměrném nápravovém zatížení.



Obr. 3 Koeficient konstantní složky vozidlového odporu kontejnerových vlaků pro použití v trakčních výpočtech vyhodnocený pro soupravu vozů (vlevo), resp. pro celý vlak včetně lokomotivy (vpravo); čárkovaně je znázorněna hyperbolická závislost dle vztahu (3); v levém grafu je porovnání s odpovídajícími hodnotami konstant stávajících měrných vozidlových odporů kategorií „U4“, „S“ a „T4“ (šedou čerchovanou čarou)

Tab. 4 ukazuje porovnání zátěžových tabulek pro lokomotivu o výkonu 4500 kW a s trvalou tažnou silou 220 kN (a s trvalou rychlostí 74 km/h) jednak pro případ nově navrženého vozidlového odporu kategorie „K2“ a jednak pro standardní vzorce vozidlového odporu „T4“ a „S“. Pro lepší porovnatelnost je ve všech uvažovaných případech hmotnost lokomotivy zahrnuta do hmotnosti vlaku a její vozidlový odpor je předpokládán v tomtéž tvaru jako u soupravy vozů. Ukazuje se, že výsledky pro odpor „T4“ jsou v uvažovaném rozsahu hmotnosti vlaku porovnatelné s kategorií „K2“, resp. mírně lepší. V případě původní kategorie „S“ však představuje navržený přístup ke stanovení vozidlového odporu nezanedbatelné zlepšení. Pokud bychom uvažovali požadavek na schopnost jízdy ustálenou rychlostí 100 km/h do stoupání 8 ‰, lze jej splnit s vlakem o celkové hmotnosti (vč. lokomotivy) 1232 t v případě kategorie „S“, 1529 t v případě kategorie „T4“ a 1487 t v případě kategorie „K2“. Uvažujeme-li ovšem například vyvíjení trvalé tažné síly 220 kN i při rychlosti jízdy 60 km/h, vychází již nově navrhovaná formulace vozidlového odporu nejvýhodněji; konkrétně je možné požadavek na jízdu ustálenou rychlostí 60 km/h ve stoupání 8 ‰ splnit s vlakem o celkové hmotnosti 2009 t pro kategorií „S“, 2279 t pro kategorií „T4“ a 2358 t pro novou kategorií „K2“.

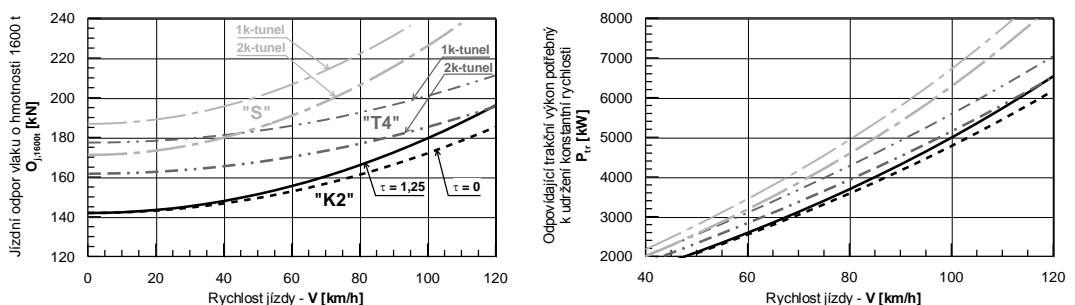
Navrhovaná formulace vozidlového odporu rovněž umožňuje aplikovat v trakčních výpočtech přesnější přístup k odporu z jízdy tunelem. V „klasické“ trakční mechanice je tento jízdní odpor sice klasifikován jako odpor traťový, z hlediska své fyzikální podstaty se však jedná o vliv tunelu na aerodynamický odpor vlaku, takže úzce souvisí s odporem vozidlovým. Tato problematika se přitom v poslední době stává velmi aktuální, protože jsou do provozu uváděny nové dlouhé tunely, v nichž jsou kromě rychlé osobní železniční dopravy provozovány i vlaky nákladní. Má-li být odpor z jízdy vlaku tunelem zohledněn v odporu vozidlovém, lze vztah (5) přepsat do tvaru:

$$O_v = A_{\kappa} \cdot M_v + \tau \cdot C_{pr} \cdot V^2, \quad (6)$$

kde τ je tunelový faktor. Při uvažování ustálených stavů (za předpokladu dlouhého vlaku v dlouhém tunelu a konstantní rychlosti jízdy vlaku, resp. rychlosti proudění vzduchu vůči vlaku) má na velikost tunelového faktoru vliv zejména poměr čelní plochy vlaku k ploše příčného řezu tunelu. Např. pro případ nového Gotthardského tunelu (GBT) s plochou průřezu cca 41 m² uvádí článek [4] pro různé vlaky hodnoty tunelového faktoru pohybující se okolo 1,5. Jedněmi z prvních dlouhých železničních tunelů v ČR budou od roku 2018 tunely Ejovice na III. železničním koridoru mezi Prahou a Plzní. Kdybychom uvažovali, že v příslušné oblasti hodnot přibližně platí přímá úměrnost mezi poměrem čelní plochy vlaku S_v k ploše příčného řezu tunelu S_t a hodnotou tunelového faktoru τ , tedy:

$$\tau \approx k \cdot \frac{S_v}{S_t}, \quad (7)$$

měl by tunelový faktor ejpovických tunelů s ohledem na větší plochu průřezu tunelové trouby oproti GBT (viz [5]) nabývat přibližně hodnoty 1,25, což tedy představuje čtvrtinový nárůst aerodynamické složky vozidlového odporu při jízdě tunelem v porovnání s jízdou vlaku otevřenou krajinou.



Obr. 4 Porovnání výsledků různých přístupů k výpočtu jízdních odporů kontejnerového vlaku o celkové hmotnosti 1600 t ve stoupání 8 ‰ v uvažovaném tunelu (vlevo) a odpovídající potřebný trakční výkon (vpravo)

V levém grafu na obr. 4 je provedeno porovnání výsledků výpočtu celkového jízdního odporu kontejnerového vlaku o celkové hmotnosti 1600 t v daném tunelu, jenž se nachází ve stoupání 8 ‰. Kromě výsledků pro vozidlový odpor „K2“ se zanedbáním tunelového faktoru a s jeho uvažováním, jsou zobrazeny výsledky získané za předpokladu, že je celý vlak určen vozidlovým odporem „T4“ a „S“, přičemž jsou variantně uvažovány standardně používané měrné odpory z jízdy dvoukolejným (1 N/kN) a jednokolejným (2 N/kN) tunelem (viz [2]). Zde je totiž důležité zmínit, že tato „klasická“ kategorizace tunelů je v trakční mechanice zavádějící, neboť nové tunely pro vyšší rychlosti jsou navrhovány jako prostornější, přičemž je z hlediska aerodynamiky důležitá plocha průřezu tunelu, zatímco počet kolejí v tomto ohledu podstatný není. Právý graf na obr. 4 porovnává odpovídající trakční výkon potřebný k udržování konstantní rychlosti vlaku. Při uvažování navrhovaného tvaru vozidlového odporu kontejnerového vlaku činí při rychlosti 100 km/h nárůst jeho velikosti vlivem tunelového faktoru 1,25 cca 7,5 kN, čemuž odpovídá nárůst výkonu cca 210 kW; při rychlosti jízdy 120 km/h jde o nárůst jízdního odporu cca o 11 kN, resp. zvýšení aerodynamických ztrát o 360 kW.

5 ZÁVĚR

V tomto příspěvku je na základě výběhů kontejnerových vlaků proveden návrh upravené metodiky pro stanovení vozidlových odporů. Z původní definice vozidlového odporu je vyčleněna jeho aerodynamická složka a pro konstantní (na rychlosti nezávislou) složku vozidlového odporu je stanovena její závislost na průměrném nápravovém zatížení. Nový přístup k výpočtu vozidlového odporu je aplikován ve dvou variantách – pro celý vlak a pro soupravu vozů. Na základě zjištěných závislostí je dále pro praktické použití navrženo upravené rozdělení kontejnerových vlaků do tří kategorií podle průměrné hmotnosti na nápravu. Pozorovaná závislost aerodynamického odporu na tvarové členitosti vlaku může být prakticky využita jako „kvantifikované doporučení“ pro ložení vlaku kontejnery v souvislosti se zaváděním systému plateb za skutečně spotřebovanou trakční energii.

V další fázi výzkumných aktivit bude nutné ověření navržené úpravy v reálném provozu, a to zejména s ohledem na zjednodušení provedená při definici kategorií „K1“ až „K3“ (volba středních hodnot koeficientu a), velký rozptyl získaných hodnot koeficientu aerodynamického odporu C , ale také prodlužování délky kontejnerových vlaků k hodnotě 650 m. Bližší pozornost, a to i v oblasti experimentální, by měla být věnována zavedení tunelového faktoru do vzorce vozidlového odporu.

Autoři příspěvku děkují Ing. Karlu Fridrichovi a Ing. Bc. Janu Komárkovi ze SŽDC, s.o., za poskytnutí dat o trati Brno–Břeclav pro účely hodnocení provozních výběhových zkoušek.



Literatura

- [1] ŠIMRAL, P., MICHÁLEK, T., KRÁLÍK, P. K problematice vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2013: XXI. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, 177–186. ISBN 978-80-7395-676-9.
- [2] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOHOUT, M. *Mechanika dopravy*. Studijní opora, 1. vydání, 78 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-739-1.
- [3] MICHÁLEK, T. Modification of train resistance formulae for container trains based on operational run-down tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. [v přípravě / in preparation]
- [4] SCHRANIL, S., LAVANCHY, V. Fahrdynamische Messfahrten im Gotthard-Basistunnel. *Elektrische Bahnen*, 2016, 114(7), 388–393. ISSN 0013-5437.
- [5] MÁRA, J., GRAMBLIČKA, M., VELEBIL, J. Ejpvické tunely, stav příprav na konci roku 2014. *Beton TKS*. 2014, 6, 3–6. ISSN 1213-3116.