

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ
KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

Martin Králík

Bakalářská práce

2018

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Králík**
Osobní číslo: **D14233**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Kolejová vozidla**
Název tématu: **Hodnocení jízdních odporů kontejnerových vlaků**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

S využitím provozních dat zpracujte problematiku jízdních odporů současných kontejnerových vlaků v podmínkách koridorových tratí SŽDC. Proveďte:

- 1) teoretický rozbor jízdních odporů železničních vozidel se zaměřením na faktory, které mohou významně ovlivňovat jejich velikost v případě kontejnerových vlaků,
- 2) návrh postupu pro stanovení vozidlového odporu kontejnerového vlaku na základě analýzy provozních dat získaných z palubního diagnostického systému lokomotivy, včetně prověření možnosti stanovení vlivu poloměru oblouku na jízdní odpor vlaku,
- 3) výběr vhodného traťového úseku pro získání potřebných provozních dat a jeho popis,
- 4) analýzu záznamů získaných z palubního diagnostického systému lokomotivy,
- 5) zhodnocení získaných výsledků.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího BP

Rozsah pracovní zprávy: 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

[1] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOHOUT, M. Mechanika dopravy - studijní opora. 1. vydání. 78 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7393-739-1.

[2] ŠIMRAL, P., MICHÁLEK, T., KRÁLÍK, P. K problematice vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: Sborník příspěvků XXI. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech 2013. S. 177-186. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-676-9.

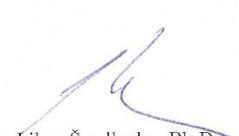
[3] SZANTO, F. Rolling resistance revisited. In: Conference on Railway Excellence - CORE 2016, Melbourne, Australia, 16-18 May 2016.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky


Datum zadání bakalářské práce: 13. února 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2017


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

L.S.


doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 13. února 2017

Prohlášení autora

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti, vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Jaroměři dne 18. 01. 2018

Martin Králík

Poděkování

Za pomoc při tvorbě této závěrečné práce musím poděkovat Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D., jakožto svému vedoucímu práce, za námět, konzultace a věcné připomínky. Nemalé díky patří zástupci dopravní společnosti METRANS Rail s.r.o. Petru Šimralovi za poskytnuté materiály a cenné poznatky z provozu.

Poděkování si neméně zaslouží pracovníci Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera, kteří nemalou měrou přispěli k rozšíření mých znalostí, ale především ke změně pohledu na studium jako takové. Byli jimi především doc. Ing. Jan Kout, CSc. a Ing. Martin Kohout, Ph.D. Nesmím zapomenout ani na své studijní kolegy, Bc. Jiřího Štembírka a Martina Jeřábka, s kterými jsem měl možnost konzultovat nejen odborná témata.

Nic z toho by však nevzniklo, pokud bych poslechl sám sebe a před třemi a půl lety nešel studovat vysokou školu. Přátelé, kamarádi, ale především má rodina mě přesvědčila o opaku a po celou dobu studia mi byli silnou oporou. Zvláštní poděkování pak patří mé přítelkyni, Janě Kužílkové, DiS., bez jejíž přítomnosti by sice studium bylo možné, avšak o dost těžší.

Anotace

Práce se zabývá rozbořem dosavadních vztahů trařových jízdních odporů a shrnuje nejnovější poznatky z revize vozidlových jízdních odporů. Provádí analýzu provozních dat kontejnerových vlaků společnosti METRANS Rail v úsecích se značným jízdním odporem z oblouku a tunelu a porovnává je s teoretickými hodnotami. Na základě výsledků se snaží určit nový směr metodiky, jenž by reálněji popisoval pohyb vozidel v oblouku.

Klíčová slova

kontejnerový vlak, jízdní odpor z oblouku, rozšířený vozidlový odpor

Title

Evaluation of running resistance of container trains

Abstract

This work deals with current relations of track running resistance and summarizes the newest knowledge from vehicle running resistances' revision. It carries out operational data analysis of the METRANS Rail container trains in the sections with considerable running resistance in both curve and tunnel and then compares it to real values. Based on outcomes it struggles to define a new direction of methods, that would more realistic describe a movement of vehicles in a curve.

Key words

container train, running resistance in a curve, extended running resistance

Obsah

1	Úvod	9
2	Rozbor sil působících proti pohybu vlaku	10
2.1	Pohybová rovnice vlaku.....	11
2.1.1	Úprava pohybové rovnice.....	12
3	Jízdní odpory	13
3.1	Vozidlové jízdní odpory	13
3.1.1	Návrh úpravy metodiky	13
3.2	Traťové odpory	15
3.2.1	Odpor ze stoupání.....	15
3.2.2	Odpor z jízdy v oblouku	16
3.2.3	Odpor z jízdy v tunelu	20
3.3	Rozšířený vozidlový odpor	21
4	Traťový úsek	22
4.1	Popis	22
4.2	Historie trati Brno – Česká Třebová	22
4.3	Parametry sledovaného úsek	23
5	Popis diagnostických dat	26
5.1	Záznamové zařízení (TELOC).....	26
5.2	GPS	27
5.3	Soupis sestavy vozidel	28
6	Hodnocení záznamů	29
6.1	Zrychlení.....	29
6.2	Průběh rozšířeného vozidlového odporu	30
6.3	Porovnání tažných sil	32

6.4	Odhad parametrů rozšířeného vozidlového odporu.....	34
6.4.1	Hodnocení výsledků.....	36
6.4.2	Doporučený tvar vztahu rozšířeného vozidlového odporu	38
6.4.3	Vliv úprav na stanovení jízdního odporu	38
7	Závěr.....	40
	Literatura	41
	Seznam příloh.....	42

1 Úvod

Po vzniku České republiky v roce 1993 se železnice začala přesouvat do ústraní, investice do dopravní cesty nebyly dostatečné, stavba moderních koridorů probíhala pomalu. Automobilový průmysl rostl, lidé si oblíbili cestovat svými vozy a přeprava nákladních zásilek se přesouvala ze železnice na silnici. Trendy přeprav se ale neustále mění. A jinak tomu není ani o více jak dvacet pět let později. Žijeme v době uspěchané, kde času není nazbyt a spokojený zákazník je klíčem úspěšného obchodu. Železnice musí sama oslovit své cestující, nikoli formou restrikcí, ale především dostatečnou včasností, vysokou úrovní služeb a přijatelnou cenou. Přeprava nákladu není výjimkou. Jednou z možností přeprav je systém nákladní kombinované dopravy, kdy je využívána doprava železniční, silniční i vodní. Zaměříme-li se na dopravu po železnici a vezmeme v úvahu její výhody (schopnost tvořit vlak, nižší energetická náročnost), vytvoříme konkurenta silniční dopravě na střední a velké vzdálenosti. Výhodou vůči dopravě lodní je pak rychlost přeprav a rozsáhlejší dopravní síť na území kontinentů. Zvýšení počtu vlaků na území našeho státu je však velmi omezeno kapacitou hlavních tratí, a proto se dopravci snaží využít každé možnosti pro přepravu většího objemu nákladu na dosavadních spojích. Ovšem současné předpisy, určující technický normativ hmotnosti vlaků, jsou kritické vůči moderním elektrickým hnacím vozidlům. Stejně tak zařazení vlaků do kategorií vozidlových odporů nemusí odpovídat realitě. Z tohoto důvodu již došlo k revizi vozidlových odporů a hodnocení výběhových zkoušek. Ty byly však provedeny zpravidla na rovinném úseku. Při jízdě na obloukovité trati a v tahu se silové poměry v soupravě mohou lišit.



Obr. 1 Kontejnerový vlak společnosti METRANS Rail.

Foto Jiří Štembírek

2 Rozbor sil působících proti pohybu vlaku

Pohyb kolejového vozidla po ocelové dráze se řídí fyzikálními zákony. Z obecné mechaniky je známo, že každé těleso v prostoru má 6° volnosti. Popis jízdy vlaku by musel obsahovat n krát 6 diferenciálních rovnic druhého řádu, kde n je počet uvažovaných těles modelu. Takový postup by vedl k velice náročným a zdlouhavým výpočtům, kde by vypovídací hodnota vzhledem k potřebám mechaniky dopravy byla neúměrně obsáhlá. Abychom byli schopni relativně jednoduše a v krátkém čase aplikovat potřebné postupy, v rámci mechaniky dopravy, teorie modelování, byly přijaty následující zjednodušující předpoklady pro pohyb vozidla či soustavy vozidel:

- vozidlo (vlak) je považován za hmotný bod (soustavu pevně spojených hmotných bodů) s jedním stupněm volnosti, tzn. zjednodušení na jedinou diferenciální rovnici s kinematickými veličinami (dráha x , rychlost v a zrychlení a) vztahující se buď k těžišti vlaku nebo jeho čelu;
- při pohybu vozidla není uvažována vnitřní dynamika v soupravě a přechodové děje, tzn. započítávají se pouze síly vnější (tažná či brzdná síla, odporové síly, tíhová síla);
- ze statických charakteristik jsou určeny síly působící na vozidlo;
- s přihlédnutím k hmotnosti vozidel a malých změn zrychlení v krátkém čase, lze přistoupit k linearizaci nelineárních průběhů, a to matematickou úpravou náhrady diferenciálních počtů diferencními.

Při dodržení výše uvedených předpokladů lze definovat pojem ideální vozidlo (vlak), čímž rozumíme hmotný bod, soustavu pevně spojených hmotných bodů, o jednom stupni volnosti a celkové hmotnosti odpovídající (1).

$$m_{vl} = m_{HV} - m_{dopr}. \quad (1).$$

2.1 Pohybová rovnice vlaku

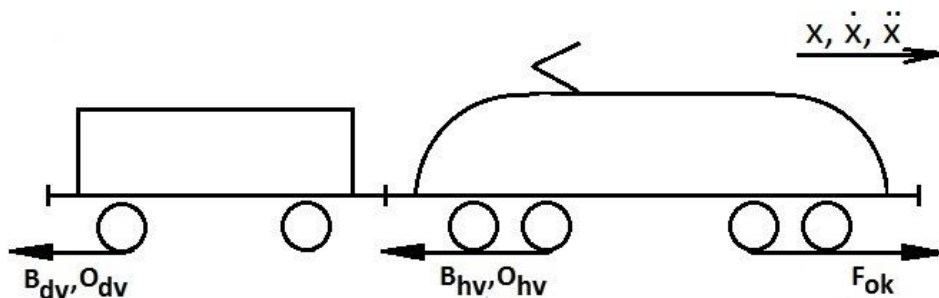
Elementární rovnicí pro řešení úloh trakční mechaniky je matematické vyjádření mechanického modelu vycházející z Newtonova principu. Je jím tzv. pohybová rovnice vlaku jejíž tvar udává rovnice (2):

$$m_{vl} \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl} \quad (2),$$

kde jednotlivé veličiny určují:

- m_{vl} – celková hmotnost vlaku [kg];
- \ddot{x} – zrychlení vlaku [$m \cdot s^{-2}$];
- F_{ok} – tažná síla hnacích vozidel na obvodu kol [N];
- B_{vl} – brzdná síla všech brzděných vozidel [N];
- O_{vl} – celkový jízdní odpor (traťový, vozidlový) [N].

Kladná či záporná znaménka v (2) určují smysl jednotlivých působících sil ve směru pohybu.



Obr. 2 Grafické znázornění vnějších sil působících na vlak.

Rovnice (2) však při své aplikaci uvažuje pouze pohyb posuvný, konkrétněji energii posuvného pohybu, což mj. správně vyplývá ze zjednodušujících předpokladů vyšetřovaného pohybu vlaku jako hmotného bodu, soustavy hmotných bodů, o jednom stupni volnosti. Některé konstrukční součásti vozidel konají pohyb obecný, posuvný i rotační, (dvojkolí, rotory trakčních motorů, nápravové převodovky apod.). Vzhledem k jejich otáčkám a momentům setrvačnosti je nelze považovat za zcela zanedbatelné. Rotační pohyb se zohledňuje součinitelem rotačních hmot. Dochází tak k úpravě na levé straně pohybové rovnice a zavádí pojem redukováná (setrvačná) hmotnost:

$$m_{red} = m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \quad (3).$$

Přesné hodnoty součinitele rotačních hmot se při znalosti konkrétních parametrů rotačních součástí dají spočítat. Obvyklé hodnoty pro jednotlivé kategorie vozidel udané v literatuře [1] můžeme považovat za dostatečné.

Pravá strana (4) prošla formální úpravou, rozdělením jízdního odporu na jednotlivé složky:

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{voz} - O_{traf} \quad (4),$$

kde platí:

- m_{vl} – celková hmotnost vlaku [kg];
- ρ – součinitel rotačních hmot [-];
- \ddot{x} – zrychlení vlaku [$m \cdot s^{-2}$];
- F_{ok} – tažná síla hnacích vozidel na obvodu kol [N];
- B_{vl} – brzdná síla všech brzděných vozidel [N];
- O_{voz} – vozidlový odpor [N];
- O_{traf} – traťový jízdní odpor [N].

Závěrem chce autor doplnit, že při jízdě vlaku je uvažována buď síla tažná na obvodu kol hnacích vozidel F_{ok} při jízdě v tahu, či síla brzdná B_{vl} na všech brzděných vozidlech vlaku. Současné působení obou sil by způsobilo nežádoucí dynamické účinky v soupravě, které by v krajním případě mohly vést k roztržení vlaku.

2.1.1 Úprava pohybové rovnice

Potřebou získat soubor dat, jež bude definován jízdními odpory bez striktního fyzikálního odvození, tedy zpravidla empiricky zjištěné, vedlo autora k uvažování tohoto souboru jako celku. Soubor je definován jako součet vybraných traťových odporů a odporu vozidlového. Soubor nazýváme rozšířeným vozidlovým odporem:

$$O_{rvo} = O_{voz} + O_R + O_{tun} \quad (5).$$

Přesto, že jsou jízdní odpory z oblouku a tunelu odpory traťovými, mají na jejich velikost významný vliv parametry vozidel. Bližší rozbor jízdních odporů z (5) je uveden v následujících kapitolách, kde je blíže pojednáno o příčinách silových účinků, působících vlivů při jízdě vozidla, případně návrh pro snížení těchto odporových sil.

Podoba pohybové rovnice vlaku použitá pro následující výpočty má následující tvar¹:

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - O_{sklon} - O_{rvo} \quad (6).$$

¹ U sledovaných vlaků nedošlo k vývinu brzdných sil.

3 Jízdní odpory

Pohybuje-li se vozidlo po koleji jistou rychlostí, musí překonávat odporové síly působící proti smyslu jeho pohybu. Takové odporové síly se nazývají jízdními odpory. Pro přehlednost jsou jízdní odpory rozděleny do dvou základních kategorií podle jejich fyzikální podstaty:

- vozidlové jízdní odpory;
- traťové jízdní odpory.

3.1 Vozidlové jízdní odpory

Podrobným rozborem vozidlových jízdních odporů se zabývá bakalářská práce [2]. Přesto si autor dovoluje zde uvést malé shrnutí výsledků na téma *Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků* [3], probíraného na konferenci Současných problémů v kolejových vozidlech.

3.1.1 Návrh úpravy metodiky

Současné výpočtové metody vozidlového odporu kontejnerových vlaků se ukázaly během posledních několika let jako nedostačující. Dle provozních zkušeností by moderní elektrické lokomotivy dokázaly odvézt na kvalitní koridorové trati těžší vlak.

Pro stanovení příslušného měrného vozidlového odporu se správce infrastruktury řídí předpisem Č(S)D V7 [7] vydaném v roce 1982 (revize některých vzorců proběhla roku 1992). Tyto hodnoty byly zjištěny experimentálně (výběhovou zkouškou) a dle parametrů jednotlivých vozidel zavedeny příslušné kategorie. Provoz většiny kontejnerových vlaků spadá dle tabulek do následujících kategorií:

- U4 (4n. nákladní vozy prázdné): $o_{U4} = 2,278 - 0,0004 \cdot V + 0,000437 \cdot V^2$;
- S (vozy se středním nápravovým zatížením): $o_S = 1,9 + 0,00035 \cdot V^2$;
- T4 (4n. nákladní vozy, ložené): $o_{T4} = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2$.

I když většina kontejnerových vlaků společnosti METRANS Rail je zatížena středním nápravovým zatížením (kategorie S), uvažuje se na základě výsledků z [2] v trakčních výpočtech u těchto vlaků s kategorií vozidlového odporu T4. Tato kategorie vykazuje při běžných rychlostech nákladních vlaků až o 30 % menší měrný vozidlový odpor. Výhodou je možné zvýšení technického normativu hmotnosti vlaku.

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

Ke snížení vozidlového odporu přispěly nemalou měrou opatření nových konstrukčních prvků (klidnější jízda vozidel na tratích s kvalitním železničním svrškem), ale i rozšířený počet vozidel s nekovovými brzdovými špalíky. Původní, a doposud v praxi používaná, rovnice uvažuje součin tíhy a všech složek vozidlového odporu v měrném tvaru, včetně jeho aerodynamické složky:

$$O_v = (o_{val} + o_{lož} + o_{aer}) \cdot G_v \quad (7);$$

kde veličina o_{val} charakterizuje odpor z valení [$N \cdot kN^{-1}$], $o_{lož}$ měrný odpor v ložiskách vozidel [$N \cdot kN^{-1}$], o_{aer} měrný odpor z prostředí (aerodynamický odpor) [$N \cdot kN^{-1}$] a G_v je tíhou vozidel [N].

To však odporuje fyzikální podstatě, kdy aerodynamický odpor by neměl být závislý na tíze vlaku. Vyhodnocením výběhových zkoušek kontejnerových vlaků došlo k úpravě stávající rovnice, která se svými hodnotami více podobá skutečným výsledkům vozidlového odporu ve výběhu a již neodporuje fyzikálnímu opodstatnění:

$$O_v = a_{Ki} \cdot M_v \cdot g + C \cdot V^2 \quad (8);$$

kde M_v je hmotnost vlaku [t], g tíhové (gravitační) zrychlení [$m \cdot s^{-2}$], a_{Ki} koeficient na rychlosti nezávislé složky vozidlového odporu [$N \cdot kN^{-1}$], C koeficient aerodynamického odporu vlaku [$N \cdot h^2 \cdot km^{-2}$] a V okamžitá rychlost [$km \cdot h^{-1}$].

Určení konstanty a a C závisí na mnoha faktorech, které v provozu nejsou pro jízdu vlaku vůbec hodnoceny (průměrná hmotnost na nápravu, počet nových čel vlaku) a vedly by ke značné rozmanitosti kategorií vlaků. Z tohoto důvodu autor původního textu přistoupil k zavedení obdobných kategorií jako doposud (U4, S, T4) s přihlédnutím na zmiňované faktory:

- K1 – lehké vlaky s průměrnou hmotností 5 až 10 t na nápravu;
- K2 – středně těžké vlaky s průměrnou hmotností 10 až 18 t na nápravu;
- K3 – těžké vlaky s průměrnou hmotností 18 až 22,5 t na nápravu.

Konstanta C se uvažuje jako průměrná hodnota koeficientu aerodynamického odporu s ohledem na výsledky hodnocení výběhových zkoušek publikovaného v příslušném článku [3].

Pro přehled je níže uvedena tabulka se všemi potřebnými hodnotami:

Tab. 1 Konstanty pro nově zvolené kategorie k dosažení do (8).

Kategorie konstant	konstanta a_{k1}	konstanta A_{k1}	konstanta a_{k2}	konstanta A_{k2}	konstanta a_{k3}	konstanta A_{k3}	konstanta C
Celý vlak (vč. HV)	1,28	12,6	1,04	10,2	0,95	9,3	3,01

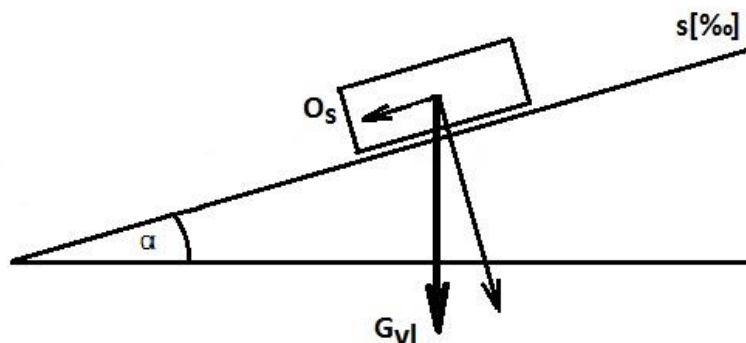
Autor původního textu [3] udává několik příkladů využití. Aplikace vozidlového odporu K2 v trakčním výpočtu mechanického modelu (hnací vozidlo o výkonu 4 500 kW, trvalá tažná síla 220 kN) vykazuje mírně vyšší hodnoty vůči původní kategorii T4 (tím umožňuje nižší dosažitelnou rychlost ve sledovaném úseku), avšak vzhledem k vozidlovému odporu kategorie S jsou tyto hodnoty znatelně nižší. To vše především při rychlostech přibližně nad 80 km/h. V oblastech rychlostí nižších, chceme-li spíše kritických, při rychlosti jízdy 60 km/h, vyvíjení trvalé tažné síly 220 kN, stoupání 8 ‰, může celková hmotnost vlaku dosahovat 2009 t pro kategorii S, 2279 t pro kategorii T4 a 2358 t pro nově zvolenou kategorii K2.

Tato práce uvažuje v různých porovnáních s vozidlovým odporem kategorie T4 a ověřuje jej při jízdě vozidel v tahu.

3.2 Traťové odpory

3.2.1 Odpor ze stoupání

Na jízdu vlaku do stoupání působí odporová síla proti smyslu jeho pohybu. Jedná se o složku tíhy v požadovaném směru. Ze znalosti základů statiky je patrná totožnost s tělesem na nakloněné rovině.



Obr. 3 Grafické znázornění odporu ze sklonu.

Sklon koleje s udává změnu výšky koleje v metrech na vzdálenosti 1000 m. V matematickém vyjádření (9) dochází ke zjednodušení goniometrické funkce při malých úhlech:

$$O_s = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha = m_v \cdot g \cdot \frac{s}{1000} \quad (9).$$

Značnou výhodou je totožnost měrného odporu ze stoupání o_s a sklonu koleje s :

$$o_s = \frac{O_s}{M_v \cdot g} = s \quad (10).$$

Odpor ze stoupání není klasickým pasivním odporem. Se změnou výšky se mění potenciální energie vlaku, tzn. při jízdě do stoupání vozidla akumulují energii, aby je při jízdě ve spádu mohli opět vydat a přeměnit na energii kinetickou. S výhodou se tomu dá využít u elektrických hnacích vozidel s rekuperační elektrodynamickou brzdou, kdy je kinetická energie přeměněna na energii elektrickou.

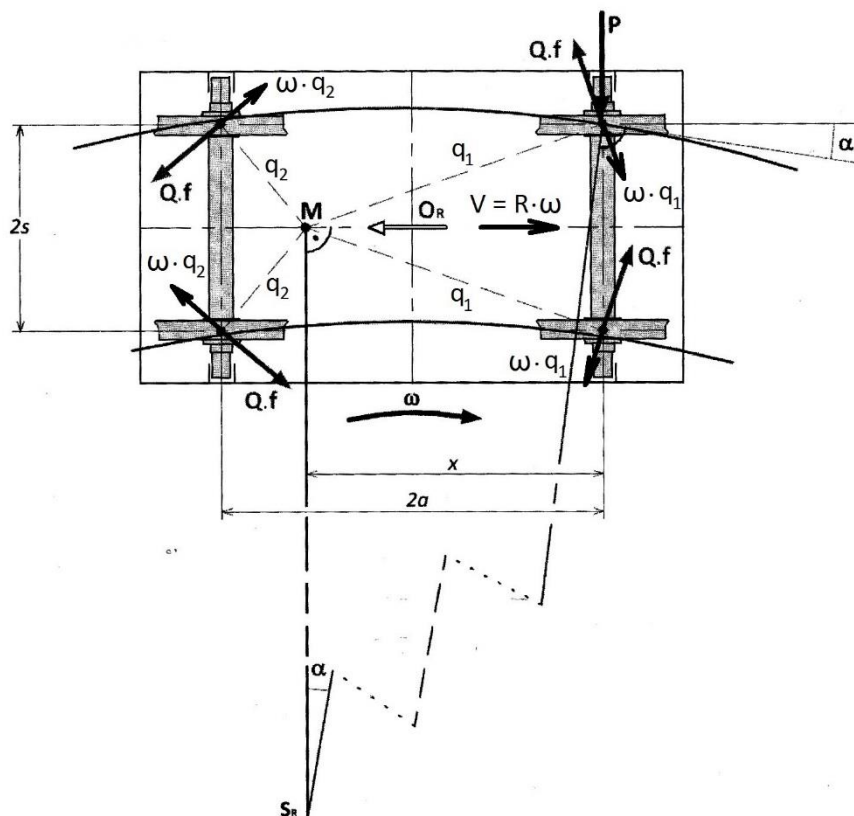
Fyzikální odvození je zcela korektní a v této práci je s ním tak uvažováno.

3.2.2 Odpor z jízdy v oblouku

Při průjezdu vozidla obloukem vznikají silové účinky mezi kolem a kolejnicí. Faktory ovlivňující velikost jízdního odporu jsou: velikost odstředivých účinků (rychlost a poloměr oblouku), součinitel tření f mezi kolem a kolejnicí, úhel náběhu α , tvar jízdního obrysu kol, příčné profily hlav kolejnic a konstrukční provedení pojezdu vozidla. Silovým působením styku kola a kolejnice a vyšetřováním polohy vozidla (podvozku) se zabývá Heumannova metoda [4]. Heumannova metoda umožňuje přibližné vyšetření řídicích sil vozidla při průjezdu obloukem, jež jsou přímo úměrné jízdnímu odporu (11). Uvedená metoda se dá považovat za spolehlivou především u oblouků s malým poloměrem.

Jedním ze zjednodušujících předpokladů pro řešení je ustálená relativní poloha vozidla (podvozku) vůči kolejnici, tj. konstantní úhel náběhu α . Poté lze rozdělit pohyb vozidla (podvozku) v oblouku na dva současné pohyby:

- translační pohyb – kruhový pohyb v oblouku o poloměru R úhlovou rychlostí ω ;
- rotační pohyb – střed otáčení v bodu M na ose vozidla (střed otáčení leží na patě kolmice spuštěné ze středu oblouku na osu vozidla).



Obr. 4 Síly působící na vozidlo (podvozek) v oblouku [4].

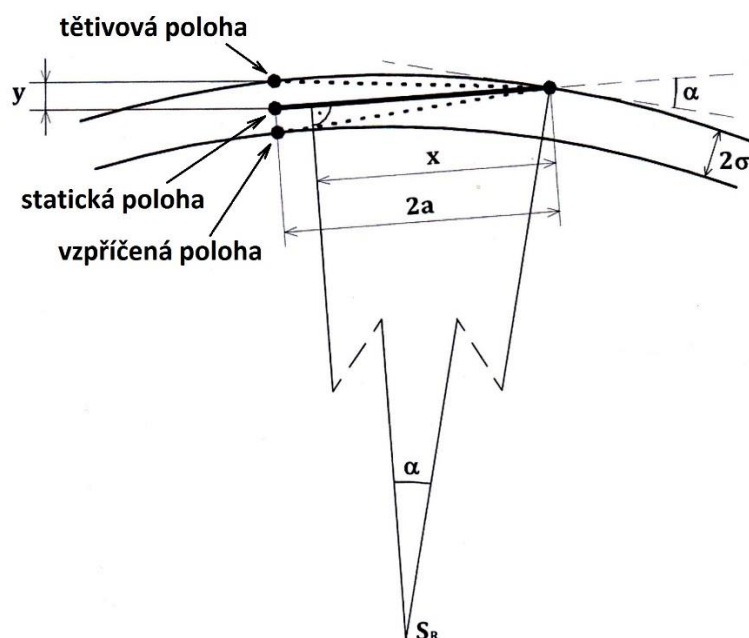
Translačním pohybem se pohybuje pouze bod M, proto dochází ke klouzání kol po kolejnicích. Rychlost klouzání je závislá na vzdálenosti středu otáčení M a dotkových bodů kol a kolejnic (q_1 a q_2). Skluzová rychlost má vždy velikost $\omega \cdot q_i$. Reakcí na toto klouzání působí třecí síly $Q \cdot f$, které tvoří odpor proti natáčení vozidla. Moment třecích sil je vyvážen momentem řídicí síly P , působící mezi kolem a kolejnicí u prvního dvojkolí ve směru jízdy. Řídicí síla P se určuje ze statické rovnováhy polohy vozidla (podvozku) vůči koleji. Při uvažování ostatních zjednodušujících předpokladů (viz níže), známé vzdálenosti bodu M od prvního dvojkolí a poloměru oblouku můžeme vyjádřit velikost odporu z jízdy obloukem:

$$O_R = P \cdot \frac{x}{R} = P \cdot \alpha \tag{11}.$$

Zjednodušující předpoklady Heumannovy metody

- jízdní obrys kol uvažován válcový;
- konstantní součinitel tření f u všech kol;
- kolové síly na všech kolech stejné;
- řídicí síla P nemá svislou složku a působí z kolejnice na okolek v rovině, jenž prochází osou nápravy a je kolmá na rovinu koleje;
- nepůsobí klopné momenty;
- vozidlo nevyvíjí tažnou ani brzdou sílu;
- dvojkolí je k rámu vázáno ve vodorovné rovině tuhou vazbou.

Vozidlo (podvozek) při průjezdu obloukem zaujímá určitou polohu vůči koleji, která je omezena volným kanálem koleje. První dvojkolí zpravidla nabíhá na vnější kolejnicový pás. Obr. 5 ilustruje tři možné polohy vozidla (podvozku) vůči koleji, kde dvojkolí jsou znázorněny body, koleje dvěma čarami (2σ šířka volného kanálu koleje), y vzdálenost druhého dvojkolí od vnějšího kolejnicového pasu, $2a$ rozvor vozidla (podvozku), x vzdálenost středu otáčení (bod M) od prvního dvojkolí a α úhel náběhu (úhel mezi podélnou osou vozidla (podvozku) a tečnou k oblouku koleje v místě prvního, vodícího, dvojkolí).



Obr. 5 Obecná poloha dvounápravového vozidla (podvozku) ve volném kanálu koleje [4].

Vozidlo (podvozek) může zaujmout tři základní polohy:

- poloha těživová – přední i zadní dvojkolí přiléhají k vnějšímu kolejnicovému pásu, úhel náběhu je minimální;
- poloha statická – obecná poloha vozidla (podvozku);
- poloha vzpříčená – přední dvojkolí se dotýká vnějšího kolejnicového pásu, zadní dvojkolí se opírá okolkem o vnitřní kolejnicový pás, úhel náběhu je maximální.

Vztahy pro výpočet odporu z jízdy v oblouku

Z výše uvedeného vyplývá, že pohyb vozidla v oblouku je ovlivňován velkým množstvím faktorů, jež jsou často velmi proměnlivé a některé jsou zjistitelné pouze experimentálně (součinitel tření f). O velikosti odporových sil rozhodují mnohdy okamžité geometrické a skluzové poměry dvojkolí a koleje, charakteristiky silové vazby dvojkolí k rámu vozidla, konstrukční provedení pojezdu apod. Pro potřeby výpočtů v trakční mechanice se na území ČR využívá několika empirických vztahů (Röcklův vzorec) [7]:

$$o_R = \frac{a}{R - b} \quad (12);$$

s konstantami:

$$a = 650 \text{ a } b = 55 \text{ pro } R \geq 500 \text{ m,}$$

$$a = 500 \text{ a } b = 30 \text{ pro } R < 500 \text{ m.}$$

Univerzálnější a vhodnější pro potřeby numerických výpočtů je vztah (13), jež byl použit pro srovnání se skutečnými hodnotami v této práci [8]:

$$o_R = \frac{600}{R} \quad (13).$$

Dále je zde pojednáno o zahraničním přístupu k odporu z oblouku. Základní myšlenkou ruských vědců je pohlížet na odpor z jízdy v oblouku jako závislém nejen na poloměru, ale i převýšení oblouku a rychlosti jízdy v něm [9]. Pro každou hodnotu převýšení a poloměru oblouku existuje rychlost, při níž je příčná nevyrovnaná síla působící na vozidlo nulová. Při této rychlosti je odpor z jízdy obloukem minimální. Se změnou převýšení koleje (zvyšujícím se nedostatkem převýšení, nebo s rostoucím přebytkem převýšení) či změnou rychlosti se tento odpor zvyšuje. To dokládají i provedené zkoušky s různými typy vozidel, kdy výsledkem závislosti odporu z jízdy v oblouku na rychlosti je téměř symetrická konvexní parabola (při snižování rychlosti jízdní odpor stoupá rychleji nežli při zvyšování rychlosti). Testy byly bohužel provedeny pouze na

zkušební trati s poloměrem $R = 955$ m, a tak není zcela jasné, jak do výsledného vztahu zahrnout vliv poloměru oblouku. Proto i v Rusku přistoupili k používání experimentálně zjištěných hodnot:

$$o_R = \frac{700}{R} \quad (14).$$

V Německu, Rakousku, Švýcarsku si dostačují se vztahem (12) s tím rozdílem, že hranice změny konstant je $R = 300$ m, nikoli jak je uvedeno výše. Anglie využívá (13), Itálie pozměnila konstantu čitatele (15):

$$o_R = \frac{800}{R} \quad (15).$$

Základní výraz popisující odpor z jízdy v oblouku je velmi podobný u většiny států Evropy [9]. Odlišné konstanty lze vysvětlit provedeným měřením na tratích s nesterjními parametry, stavebními úpravami, použitím jiných typů kolejnic apod., ale i jiných konstrukčních provedení sledovaných vozidel.

3.2.3 Odpor z jízdy v tunelu

Při průjezdu vozidla tunelem dochází vlivem změny proudění vzduchu k vytvoření dalšího jízdního odporu. Jeho hodnoty se určují empiricky. Dosavadní výpočty v trakční mechanice znějí takto [7]:

- $O_{\text{tun}} = 2$ N/kN (jednokolejný tunel);
- $O_{\text{tun}} = 1$ N/kN (dvoukolejný tunel).

Dochází zde ovšem ke stejné nepřesnosti jako u odporu z prostředí. Tunelový odpor je více závislý na průřezu čela vlaku a jeho délce, proudění vzduchu vůči soupravě a délce a ploše průřezu tunelu, nikoli celkové hmotnosti vlaku. Proto by bylo přínosné, po vzoru [3], pohlížet na odpor z jízdy v tunelu jako na změnu proudění vzduchu:

$$O_v = a_{Ki} \cdot M_v \cdot g + \tau \cdot C \cdot V^2 \quad (16),$$

kde τ nazýváme tunelovým faktorem. Ten je závislý především na poměru čelní plochy vlaku a průřezu tubusu tunelu.

3.3 Rozšířený vozidlový odpor

Rozšířený vozidlový odpor je součtem jízdních odporů (vozidlového, traťového – odpor z jízdy v oblouku a tunelu), u nichž se projevuje závislost na konstrukci, technickém stavu a rychlosti jízdy vozidla.

$$O_{RVO} = O_{voz} + O_R + O_{tun} \quad (17).$$

S výhodou jsou v něm zakomponovány veškeré jízdní odpory, jež nemají exaktní vyjádření, a jejich přesné určení je neustálým předmětem výzkumu. Jeho zavedením se v pohybové rovnici vlaku jasně oddělily veličiny fyzikálně odůvodnitelné a veličiny experimentálně zjistitelné. Při znalosti zbylých prvků pohybové rovnice vlaku tedy lze rozšířený vozidlový odpor vyjádřit a podrobit jej bližší analýze.

4 Traťový úsek

4.1 Popis

Přepravní společnost METRANS Rail dopravuje své vlaky po mnoha železničních tratích v Evropě. Výjimkou není ani mezinárodní železniční nákladní koridor RFC7 na území České republiky. Železniční trať z Prahy přes Českou Třebovou, Brno, Břeclav a dále na státní hranici se Slovenskem, případně Rakouskem, je součástí I. tranzitního koridoru. S výjimkou železničních uzlů Pardubice, Česká Třebová, Brno a úseku mezi Chocní a Ústím nad Orlicí se jedná o modernizovanou trať. V celé své trase je vedena minimálně dvěma traťovými kolejiemi s napájením stejnosměrnou soustavou 3 kV (Praha – Svitavy) a střídavou napájecí soustavou 25 kV 50 Hz (Svitavy – Břeclav – st. hranice), maximální povolenou rychlostí až 160 km/h a dovolenou traťovou třídou zatížení D4 (úsek Břeclav – st. hranice Slovenska D3). Nejvíce omezujícím faktorem pro provoz vozidel zahraničních dopravců, a tedy nedostatečné interoperability, je absence traťové části evropského vlakového zabezpečovače ETCS. To by se mělo změnit v následujících letech, kdy má proběhnout, případně již probíhá, instalace traťové části ETCS na I. tranzitním koridoru v úseku Praha – Břeclav – st. hranice.

4.2 Historie trati Brno – Česká Třebová

Historie této trati sahá do 19. století, kdy roku 1843 započala stavba trati Brno – Česká Třebová vlastněné Severní státní dráhou. Stavba 21 km dlouhého úseku z Brna do Blanska byla zadána italské firmě podnikatele Felice Tallachiniho. Muselo být přistoupeno k ražbě celkem 10 dvojkolejných tunelů. Za zajímavost lze považovat, že po dostavbě zde byla položena pouze kolej jedna. Dostavba druhé proběhla o téměř dvacet let později. Navazující část tratě z Blanska do České Třebové vyhotovila firma bratří Kleinů. V roce 1958 došlo ke zdvoukolejnění tratě Brno – Havlíčkův Brod – Kolín a následné elektrifikaci, a tak většina tranzitní vozby, nákladní i osobní rychlíkové, byla přesunuta. Od 60. let do 90. let minulého století probíhaly předelektrifikační úpravy, aby v letech 1996–1999 mohlo dojít k elektrifikaci a dne 24. ledna 1999 mohl být spuštěn pravidelný, již plně elektrizovaný, provoz. Následně se z vysočinské trati přesunuly mezinárodní rychlíkové spoje a spoje vyšší kvality zpět na trať dnešního I. tranzitního koridoru. V dnešní podobě úsek Brno – Blansko protíná pouze osm železničních tunelů, z nichž jeden je veden ve dvojím tubusu jako jednokolejný.

4.3 Parametry sledovaného úsek

S ohledem na sledované parametry bylo zapotřebí vybrat úsek s vysokou četností oblouků, případně tunelů. Těmto parametrům vyhovuje jižní větev I. tranzitního koridoru, tj. Brno-Maloměřice (mimo) – Blansko (mimo), konkrétně kilometrická poloha 161,681 – 178,529 km. Při výjezdu z Brna-Maloměřic se trať stáčí na sever a pokračuje soustavou tzv. Blanenských tunelů. Údolím řeky Svitavy prochází železničními zastávkami Bílovice nad Svitavou a Babice nad Svitavou, dále železniční stanicí Adamov a Adamov zastávka. Sledovaný úsek končí u první pojížděné výhybky železniční stanice Blansko. Na úseku dlouhém téměř 17 kilometrů se nachází 46 oblouků, shodně orientovaných i protisměrných, s minimálním poloměrem 265,1 metru, maximální stoupání činí 10,15 promile, nadmořská výška před vjezdem do prvního tunelu činí 225 m n. m., na konci sledovaného úseku 275 m n. m, traťová rychlost se pohybuje v rozmezí od 70 km/h do 95 km/h.



Obr. 6 Náskres tratě

Zmíněný úsek je vhodný z následujících důvodů:

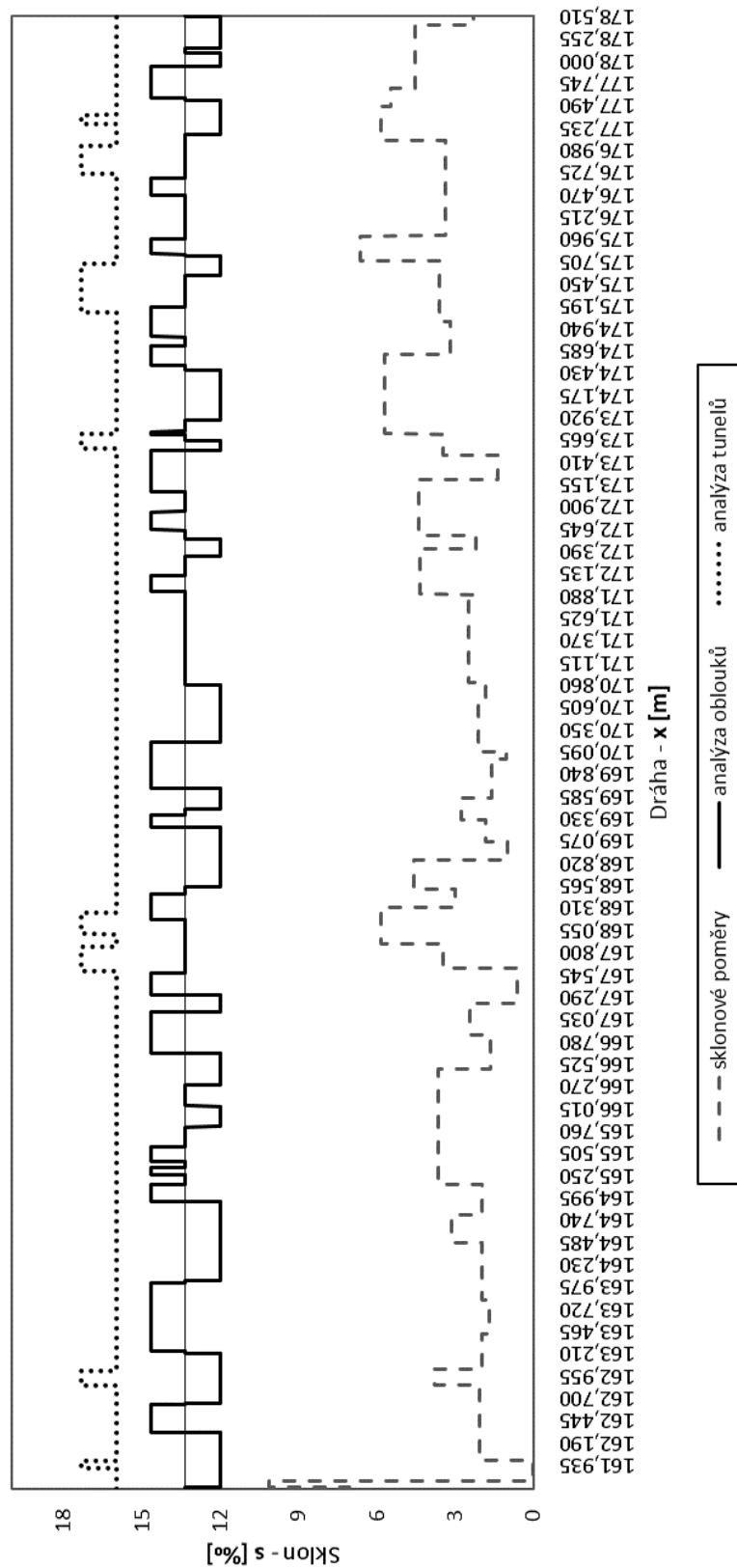
- trvalé stoupání a značné jízdní odpory vyžadují pro jízdu konstantní rychlostí neustálé vyvíjení tažné síly;
- množství oblouků menších poloměrů je vhodné pro ověření jízdního odporu z oblouku.

Podkladem pro vytvoření modelu tratě byla technická dokumentace z průběhu rekonstrukce v roce 1998. Výpis v tab. 1 ilustruje potřebná data. Každá kilometrická poloha na trati obsahuje údaj o stavu koleje (přímá, oblouk, přechodnice), případně poloměr oblouku (oblouk s kladným poloměrem se stáčí vpravo vůči začátku tratě) a délku oblouku v metrech, sklon koleje v promilích a údaj o tunelu (1 – dvoukolejný tunel, 2 – jednokolejný tunel; číslice vycházejí z měrného odporu z jízdy tunelem).

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ*Tab. 1 Důležité parametry pro sestavení modelu tratě.*

Kilometrická poloha	Úsek na trati	Poloměr oblouku	Délka oblouku	Sklon koleje	Tunel
173,589	OBLOUK	-940	62,09	3,477	1
173,615	OBLOUK	-940	62,09	3,477	1
173,641	OBLOUK	-940	62,09	3,477	1
173,667	PŘÍMÁ			3,477	1
173,693	PŘÍMÁ			3,477	1
173,719	PŘÍMÁ			3,477	1
173,745	OBLOUK	6000	32,644	3,477	1

Grafické znázornění sledovaného úseku nabízí obr. 6 na dalším listu. Levá svislá osa udává sklon v promilích a vztahuje se pouze na křivku nejnižší, tj. průběh sklonu. Průběhy oblouků a tunelů nenabývají konkrétních hodnot (oblouky mají zohledněnu orientaci (vzhledem k začátku tratě záporná – vlevo, kladná – vpravo), nikoli velikost jejich poloměrů a rozlišení jedno či dvoukolejných tunelů).



Obr. 7 Grafické znázornění sledovaného úseku v celé délce – nejnižše průběh sklonu, uprostřed průběh oblouků, nejvýše jednotlivé tunely.

5 Popis diagnostických dat

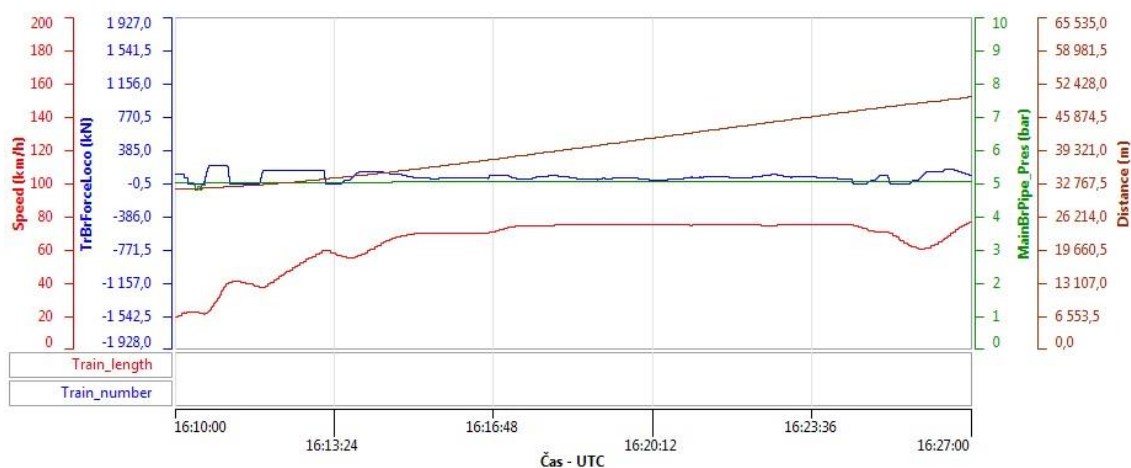
Potřebná diagnostická data lze rozdělit do dvou základních částí – údaje o vlaku a údaje o trati. Popis sledovaného traťového úseku byl popsán v předešlé kapitole. Záznamy o tažné síle a průběhu rychlosti jsou ukládány do záznamového zařízení TELOC, jímž jsou vybaveny lokomotivy TRAXX F140 MS2e dopravce METRANS Rail, ze kterých byly použité záznamy využity. Pro přesnější určení polohy vlaku na trati byly zpracovány údaje z externí GPS umístěné na tentýž vozidlech. Vzhledem k množství dat, lepší přehlednosti výpočtů a možnosti vykreslení požadovaných grafických závislostí autor přistoupil k použití výpočetní techniky. Zcela dostačujícím softwarem byl zvolen Microsoft Excel 2016.

Předběžným zhodnocením sestav jednotlivých souprav bylo přistoupeno k sestavení mechanického modelu vlaku s délkou integračního kroku 26 metrů. Hlavní míru hrála délka běžně dopravovaných vozidel, která se dle dostupných informací pohybovala od 25,94 metru do 26,39 metru. Drobné nepřesnosti v řádech desítek centimetrů byly vyhodnoceny jako nepodstatné. Došlo tím ke značnému zjednodušení následných rovnic, jelikož každá část měla přesně definovanou hmotnost a nemuselo docházet k rozložení hmotností do dvou či více částí vlaku.

5.1 Záznamové zařízení (TELOC)

Jedná se o záznamové zařízení firmy HaslerRail pro získávání, záznam a správu dat. Zařízení je součástí vozidel a dokáže sledovat širokou škálu parametrů během jízdy (rychlost, tažnou sílu, ujetou dráhu, počet ujetých kilometrů vozidla od poslední prohlídky, celkový počet kilometrů vozidla aj.). Záznamy jsou z vozidel stahovány při běžných provozních prohlídkách. Jejich vyhodnocení se provádí přes dodávaný software EVA2. Ukázka zobrazení dat je uvedena na obr. 8.

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

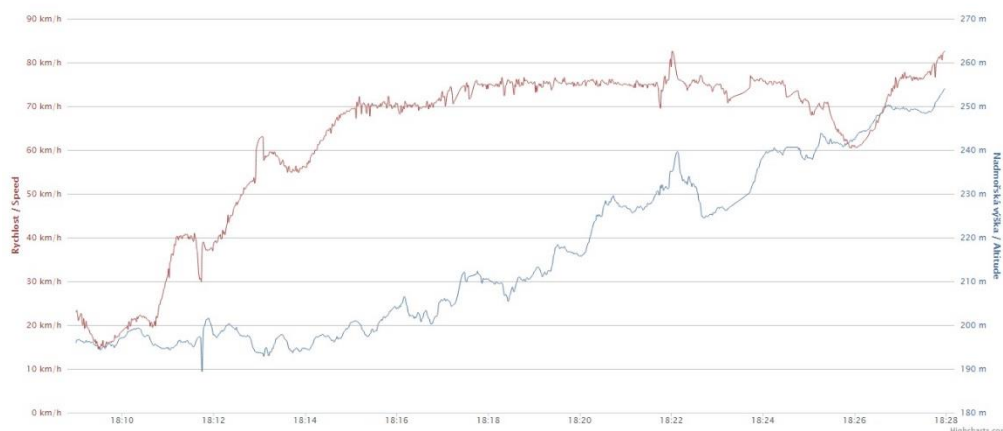


Obr. 8 Záznam vlaku 41734 ze dne 27. 08. 2017; průběhy rychlosti, tažné síly, dráhy a tlaku v hlavním potrubí.

Nespornou výhodou je možnost exportu dat do souboru Microsoft Excel. Nevýhodou je nestejný krok snímání, a to nejen na čase, ale především na dráze, a duplicita dat. Při zpracování muselo dojít k odstranění duplicit a metodou lineární interpolace ve výpočetním programu Mathcad 15.0 k získání potřebných dat (rychlosti a tažné síly).

5.2 GPS

Vozidla společnosti METRANS Rail mohou být vybavena externím modulem GPS. Přes webový portál lze sledovat jejich polohu (aktuální i dosaženou), rychlost, číslo a hmotnost vlaku, případně sílu signálu GSM. Výše uvedené záznamy se ukládají a je možné informace zpětně dohledat, potažmo vykreslit v grafu (viz obr. 9) či na mapě. Porovnáním s daty ze záznamového zařízení TELOC bylo umožněno takřka přesné usazení vozidla do modelu trati na základě časových údajů a průběhu rychlosti.



Obr. 9 Záznam vlaku 41734 ze dne 27. 08. 2017; časové údaje s obr. 8 nesouhlasí vzhledem k posunu časových pásem jednotlivých zařízení.

5.3 Soupis sestavy vozidel

Soupis sestavy vozidel je potřebný pro jízdu všech vlaků. Udává nejen čísla vozů, ale i délku vozidel, počet náprav, dopravní hmotnost či informaci o nebezpečném nákladu. Pro potřeby výpočtu je nezbytná především informace o délce a hmotnosti jednotlivých vozidel.

Poz. Lfd.	Číslo vozu Wagennummer					Nápravy Achsen		Délka přes nárazn. Länge über Puffer	Hmotnost Gewicht	
	1+2	3+4	5-8	9-11	12	Práz. Leer	Lož. Bel		Nákladu Ladung	Celková Gesamtgewicht
								m 1/10	in t	in t
1	33	54	4576	572	0		4	25,9	22	43
2	37	80	4576	073	3		4	25,9	23	44
3	33	54	4576	809	6		4	25,9	31	53
4	33	54	4576	131	5		4	25,9	14	38
5	33	54	4576	717	1		4	25,9	23	45
21	37	80	4561	209	0		4	25,9	25	47
22	33	54	4576	192	7		4	25,9	34	55
23	33	54	4576	788	4		4	25,9	8	30
24	37	80	4576	089	9		4	25,9	7	29
						0	108	626,0	688	1226
Počet náprav / Anzahl der Achsen:								<u>108</u>		
Počet brzd / Anzahl der Bremsen:								<u>24</u>		
Počet brzd (K) / Anz. Kunststoffbremse								<u>19</u>		
Délka vlaku / Länge über Puffer :								<u>626,0</u>	m	
Hmotnost G+P / Bremsgewicht G+P :								<u>1100,1</u>	t	
Celková hmotnost / Gesamtgewicht :								<u>1225,7</u>	t	

Obr. 10 Ukázka části soupisu sestavy vozidel vlaku 41734 ze dne 08. 11. 2017.

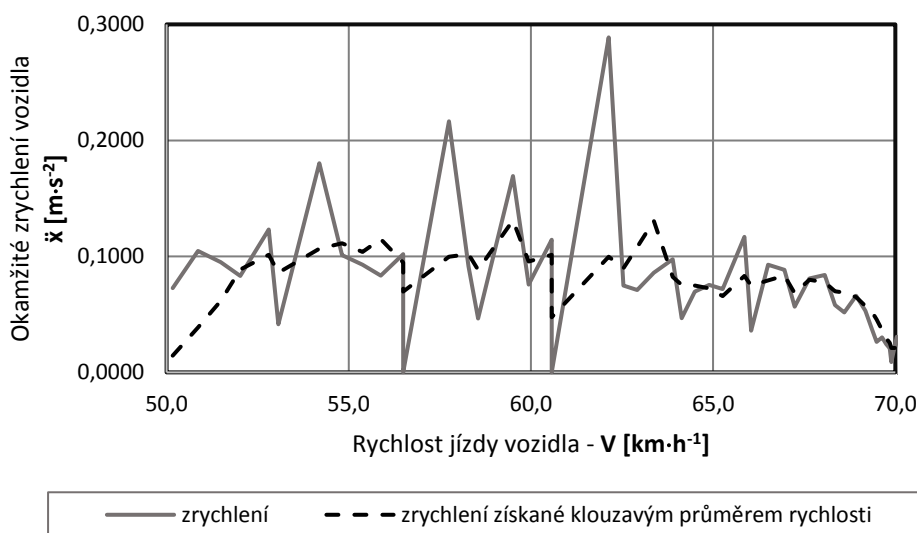
6 Hodnocení záznamů

6.1 Zrychlení

Jak je uvedeno výše, rychlost získaná ze záznamového zařízení TELOC musela být interpolována, kdy následně došlo v souladu se zvoleným integračním krokem k výběru hodnot. Uvažujeme-li malé změny rychlosti v závislosti na ujeté dráze, lze diferenciální tvar rovnice upravit na diferenční:

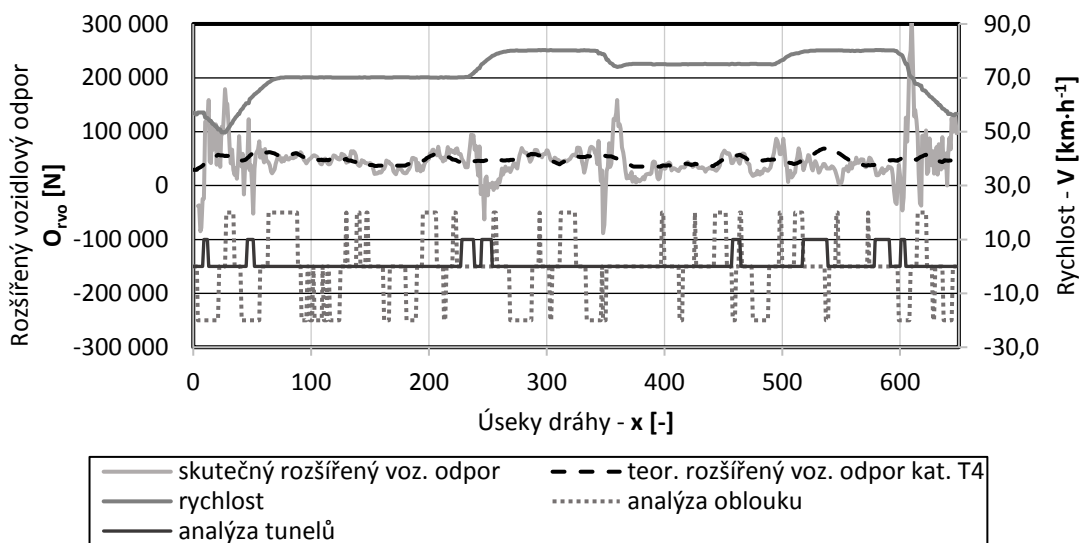
$$\ddot{x} = v \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (18),$$

kde Δv je rozdíl rychlostí, Δx délka ujeté dráhy a v koncová rychlost. V oblasti, kde dochází ke změně rychlosti vlaku, dochází také k příliš velkým amplitudám zrychlení, jak je ukázáno na obr. 11. Příčinou může být příliš velká délka integračního kroku (s tím spojené velké rozdíly zaznamenané rychlosti), ale i dynamické rázy v soupravě. Přijatelným řešením se ukázalo vyhlazení průběhu rychlosti klouzavým průměrem. Pro velký rozptyl zrychlení v oblasti změny rychlosti vlaku, a tím způsobeného velkého rozkmitu rozšířeného vozidlového odporu, vedlo autora k hodnocení a bližší analýze pouze získaných dat naměřených při konstantní rychlosti.



Obr. 11 Neúměrně velké amplitudy zrychlení při změně rychlosti z 50 km/h na 70 km/h.

6.2 Průběh rozšířeného vozidlového odporu



Obr. 12 Hodnocení skutečného rozšířeného vozidlového odporu vzhledem k rychlosti a charakteru tratě u vlaku 42006 ze dne 16. 07. 2016.

První metodou jízdy vlaku po nepřímé koleji se stalo hodnocení rozšířeného vozidlového odporu, rovnice (19), vzhledem k rychlosti a charakteru tratě. Nepříliš korektní hodnoty rozšířeného vozidlového odporu v oblasti změn rychlosti jsou důsledkem dosažení zrychlení do pohybové rovnice vlaku v těchto kritických oblastech. Při konstantní rychlosti vlaku jsou rozkmity vlivem zrychlení minimální.

$$O_{RVO_{skut.}} = F_{ok} - O_{sklon} - m_{red} \cdot \ddot{x} \quad (19).$$

Pro porovnání se skutečným rozšířeným vozidlovým odporem byla vypočtena jeho teoretická hodnota daná vztahem (17). Odpor z jízdy v oblouku je uvažován dle (13) a vozidlový odpor kategorie T4.

Hodnoty skutečného rozšířeného vozidlového odporu vesměs konvergují k teoretické křivce s výjimkou dvou oblastí. V staničení 173,901–174,421 km (470–490) vykazuje skutečná hodnota oproti teoretické značnou zápornou odchylku. Provedením rozboru daného úseku autor přisuzuje odchylku krátkým dvěma obloukům s poloměrem větší než 900 m, vyskytující se před zmiňovanou oblastí, avšak druhá polovina vlaku je stále v těchto obloucích, a dvoukolejnému tunelu. Další tunel, tentokrát jednokolejný, se nachází v kilometrické poloze 175,331–175,981 km (525–550). I zde je patrná znatelná odchylka skutečné a teoretické hodnoty rozšířeného vozidlového odporu. Rozdíly mezi skutečnou a teoretickou hodnotou rozšířeného vozidlového odporu, kdy se

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

nepravidelně střídá kladná a záporná odchylka, nelze popsat žádnou z elementárních funkcí a jeví se jako zcela nepravidelná. Za uvážení však stojí použití dosavadních vzorců při výpočtu traťového odporu z jízdy v oblouku při velkých poloměrech.

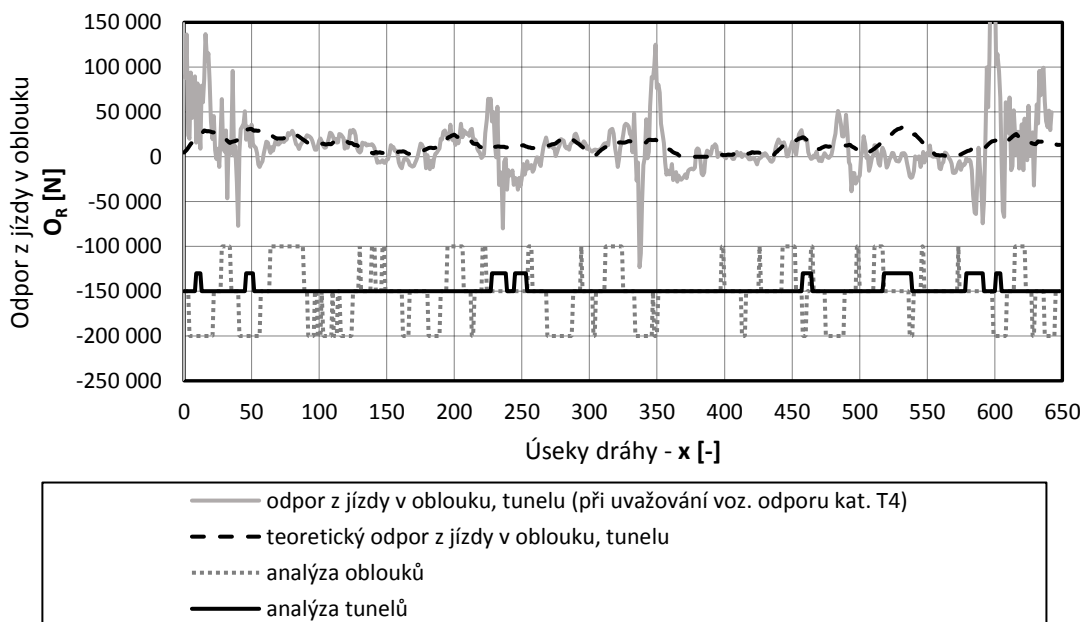
Uvažujeme-li, že skutečný vozidlový odpor kontejnerového vlaku je totožný s teoreticky zavedenou kategorií T4, jeho odečtením od skutečného rozšířeného vozidlového odporu získáme data, jež charakterizují skutečný odpor z jízdy v oblouku a tunelu:

$$O_{R+tun_{skut.}} = O_{RVO_{skut.}} - O_{voz_{T4}} \quad (20).$$

Stejně jako v předešlém případě jsou relevantní pouze data naměřená při konstantní rychlosti. Aproximací křivky skutečného odporu z jízdy v oblouku či tunelu se velmi blíží teoretickým hodnotám:

$$O_{R+tun_{teor.}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{600}{R} + o_{tun} \right) \cdot M_i \cdot g \quad (21).$$

Vzhledem k místy kladné či záporné odchylce však nedokážeme matematicky blíže popsat rozdíl mezi křivkami.



Obr. 13 Porovnání teoretického a skutečného odporu z jízdy v oblouku a tunelu u vlaku 42006 ze dne 16. 07. 2016.

Odpor z jízdy v oblouku či tunelu nemůže být z fyzikální podstaty záporný. I přesto lze takové oblasti na obr. 13 najít. Tyto záporné špičky mohou být vyvolány především zpožděním reakce hnacího vozidla na změny parametru trati. Například vozidlo projede bodem na trati, kde se mění poloměr oblouku, při dané tažné síle dojde ke změně

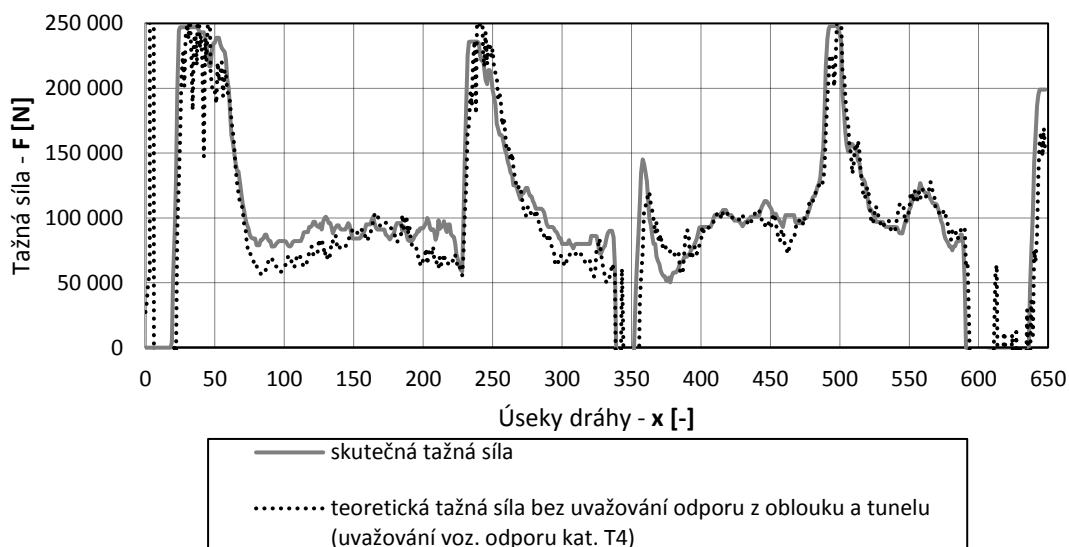
rychlosti (velmi malé změně), hnací vozidlo vyhodnotí aktuální zrychlení (pouze v režimu jízdy automatické regulace rychlosti AFB), kdy při dodržení konstantní rychlosti je ideální zrychlení nulové, a zvýší či sníží tažnou sílu. Celý proces hnacího vozidla trvá v závislosti na rychlosti několik jednotek až desítek metrů. Pokud je provoz hnacího vozidla veden v manuálním režimu, zadávání poměrného tahu (tažné síly) má plně v kompetenci strojvedoucí. Může tím docházet k prodlužování reakční doby na změnu parametru trati. K mírné změně zrychlení může také dojít vlivem neznalosti reálných podmínek (dynamika soupravy, geometrické a skluzové poměry dvojkolí a koleje apod.) Použitím reálných vozidel se dopouštíme jisté chyby, kterou je nutno brát v úvahu.

6.3 Porovnání tažných sil

Jednou z dalších metod, jak určit skutečnou hodnotu odporu z jízdy v oblouku a tunelu, je porovnání skutečné tažné síly, získané ze záznamu hnacího vozidla TELOC, a teoreticky spočítané tažné síly (22) (opět uvažujeme vozidlový odpor T4 za směrodatný). Rozdíl křivek je pak roven skutečnému odporu z jízdy v tunelu a oblouku.

$$F_{ok} = m_{red} \cdot \ddot{x} + O_{sklon} + O_{voz,T4} \quad (22).$$

Drobné vzájemné posunutí obou křivek (obr. 14) je přisuzováno sběru dat z reálného vozidla a možné odchylce při umístění vozidla na modelu trati (nepatrný časový rozdíl (jednotky sekund) dat z GPS a TELOC). Pro další postup odchylku zanedbáme.



Obr. 14 Porovnání skutečné tažné síly dle TELOC a teoretické tažné síly (neuvažujeme odpor z oblouku a tunelu). Vlak 42006 ze dne 16. 07. 2016.

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

Níže uvedená tab. 2 popisuje parametry jednotlivých úseků (minimální a maximální poloměr oblouku, náhradní poloměr oblouku vycházející z průměrné křivosti sledovaného úseku, četnost oblouků a tunelů) a poskytuje data pro porovnání průměrných měrných odporů z jízdy v oblouku a tunelem (průměrná hodnota rozdílu tažných sil podělená hmotností vlaku) zjištěných z obr. 14 a teoreticky spočtených.

Tab. 2 Dílčí parametry vybraných úseků u vlaku 42006.

Kilometrická poloha	Parametry úseků					Skutečný průměrný měrný odpor	Teoretický průměrný měrný odpor
	R _{min}	R _{max}	R _{náhr}	Četnost oblouků	Četnost tunelů		
163,761–165,581 km (80–150)	276 m	3000 m	613 m	60 %	0 %	1,01 N/kN	0,94 N/kN
165,581–166,621 km (150–190)	340 m	614 m	974 m	34 %	0 %	-0,12 N/kN	0,31 N/kN
166,621–167,531 km (190–225)	271 m	464 m	445 m	47 %	0 %	1,14 N/kN	1,05 N/kN
168,701–170,521 km (270–340)	350 m	730 m	494 m	58 %	0 %	0,88 N/kN	0,83 N/kN
171,561–173,251 km (380–445)	275 m	412 m	1211 m	14 %	0 %	-0,01 N/kN	0,15 N/kN
173,251–174,031 km (445–475)	275 m	6000 m	660 m	58 %	23 % (2 kol. tun.)	0,68 N/kN	0,90 N/kN
175,461–177,021 km (530–590)	460 m	580 m	2093 m	10 %	20 % /15 % (2/1 kol. . tun.)	-0,33 N/kN	0,80 N/kN

U tučně označených řádků se jedná o výběr dat s velkým rozdílem tažných sil. Je patrné, že odchylka teoretických odporů vůči skutečným dosahuje stěží několika setin (teoretický odpor je nižší o 6–8 %). Jedná se zpravidla o úseky s vyšší četností oblouků a menšími poloměry. Výjimku tvoří poslední tučně označený řádek, kde odchylka odporů je podstatně větší (teoretický odpor vyšší o 32 %). Četnost oblouků i velikost náhradního poloměru jsou téměř totožné s předešlými daty. Příčinou je dvoukolejný tunel ve více jak jedné pětina sledovaného úseku.

Zbylé sledované úseky (běžný text) nevykazovaly v grafu příliš znatelné rozdíly mezi skutečnou a teoretickou tažnou silou. Jedná se o úseky s nižší četností oblouků o větších poloměrech. Oproti předešlému je u těchto úseků teoretický měrný odpor vyšší v řádech desetin. Záporně vypovídající skutečný odpor je fyzikálně nevyhovující a uvažujeme ho rovný nule. Přesto je patrné, že úseky s větším poloměrem, avšak nižší četností oblouků vykazují menší rozdíl skutečného a teoretického odporu. V posledním sledovaném úseku je četnost oblouků velmi nízká a náhradní poloměr velký, přesto je zde největší rozdíl odporu. Bezesporu má na rozdíl vliv přítomnost tunelů, jež se zde vyskytují (20 % úseku dvoukolejný tunel, 15 % úseku jednokolejný tunel).

Z výše uvedeného vyplývá, že výsledky z úseků s oblouky menších poloměrů (přibližně do 700 m) a četností okolo 50 % z celkové délky sledovaného úseku jsou uspokojivé. Při změně konstanty v čitateli výrazu (13) by výsledky mohly odpovídat reálnějším hodnotám. To se však nedá říci u oblouků větších poloměrů, případně s vyšší četností (u velmi nízké četnosti jsou sice výsledky nepřesné, avšak ne tak razantní), kdy rozdíl je velmi patrný. Úseky s tunely patří mezi kritické. Projevuje se zde vliv nevhodně zvolených konstant měrného odporu z tunelu i zařazení odporu z tunelu mezi jízdní odpory traťové.

6.4 Odhad parametrů rozšířeného vozidlového odporu

Na základě poznatků z předchozí metody byly vybrány dílčí úseky určité délky, jejichž přehled je uveden v příloze č. 4. Tyto úseky jsou charakterizovány vlastní křivostí, střední hodnotou rychlosti a střední hodnotou rozšířeného vozidlového odporu. Pro přesnější výpočty začaly být uvažovány přechodnice, kterým byla udána poloviční křivost přilehlých oblouků. Na základě výsledků předchozích metod zde není uvažován vliv tunelu. Metoda je zaměřena na výpočet kompletního rozšířeného vozidlového odporu, nikoli samostatně pouze vozidlového odporu či odporu při jízdě v oblouku (tunelu), jak tomu bylo u metod předešlých. Základní tvar vychází z úpravy (8) a jeho konečnou podobu představuje rovnice:

$$O_{RVO} = A + C \cdot V^2 + D \cdot \rho \quad (23);$$

kde jednotlivé konstanty a veličiny mají význam:

- A – odpory nezávislé na rychlosti jízdy vlaku (odpor z valení, odpor v ložiskách, vliv nedokonale odlehlých zdrží), [N];
- C – konstanta popisující odpor z prostředí, [N · h² · km⁻²];

- D – koeficient charakterizující křivost úseku [$N \cdot m$]
- V – okamžitá rychlost, [$km \cdot h^{-1}$];
- ρ – střední hodnota křivosti úseku, [m^{-1}].

Rovnice (24) je výchozí pro použití metody nejmenších čtverců, kdy je zapotřebí nalézt takové koeficienty, jež nejpřesněji budou charakterizovat průběh rozšířeného vozidlového odporu.

$$S = \sum_{(i)} (A + C \cdot V^2 + D \cdot \rho - O_{RVO})^2 \quad (24).$$

Kritériem této metody je získání nejmenšího součtu kvadrátů odchylek. Lokální extrém, nejmenší součet, nastává tehdy, pokud je první derivace funkce rovna nule. Vzhledem k třem různým proměnným je zapotřebí provést postup derivování opakovaně, a to dle každé proměnné zvlášť:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial D} = 0 \quad (25).$$

Výsledek parciálních derivací vede na tři na sobě závislé rovnice, které lze s výhodou zapsat v maticovém tvaru:

$$\begin{pmatrix} n & \sum V_i^2 & \sum \rho_i \\ \sum V_i^2 & \sum V_i^4 & \sum \rho_i \cdot V_i^2 \\ \sum \rho_i & \sum \rho_i \cdot V_i^2 & \sum \rho_i^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum O_{RVO_i} \\ \sum O_{RVO_i} \cdot V_i^2 \\ \sum O_{RVO_i} \cdot \rho_i \end{pmatrix} \quad (26).$$

Konstantní rychlost, malý rozptyl rozšířeného vozidlového odporu a křivost odpovídající sledovanému úseku, to byly tři základní faktory pro výběr vhodného vlaku, vycházející z předešlého popisu metody. Neméně důležitými byla rozmanitost ve složení vlaku (sestava multimodálních čtyřnápravových vozů řady Sggnss a šestinápravových vozů řady Sggrss), hmotnost vlaku, délka vlaku, obsazení všech vozů kontejnery. Ve všech případech vlak dopravovala lokomotiva ř. 386 (Bombardier TRAXX F140 MS2e). Úseky byly rozděleny po délce 50 úseků (1300 m). U některých vlaků jsou traťové úseky totožné, u jiných nikoli. Rozbor jednotlivých vlaků ilustruje tabulka v příloze č. 4.

Tab. 3 je podrobným popisem složení sledovaných vlaků. Celková hmotnost, hmotnost na nápravu i délka vlaku je včetně lokomotivy. Poměr dopravovaných čtyřnápravových či šestinápravových vozidel vykazuje sloupec čtvrtý. Neméně důležitou vstupní proměnnou je počet sledovaných úseků, který vychází z přílohy č. 4. Konstanty A , C a D značí absolutní tvar pro celkovou hmotnost konkrétního vlaku, malá písmena a , c a d

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

v závorkách pak tvar měrný. Střední hodnoty obou variant koeficientů poukazuje poslední řádek tabulky.

Tab. 3 Parametry sledovaných kontejnerových vlaků.

Číslo vlaku	Sestava vlaku	Hmotnost vlaku [t]	Počet vozů s 4/6 nápravami [-]	Délka vlaku [m]	Hmotnost na nápravu [t/nápr.]	Počet hodnocených úseků [-]	Konst. A (Konst. a)	Konst. C (Konst. c)	Konst. D (Konst. d)
42006	ř. 386 + 23 vozů	1677	10/13	624 m	13,7	6	15 527 (0,9438)	1,51 ($9,2 \cdot 10^{-5}$)	13 317 268 (809,4)
52271	ř. 386 + 21 vozů	1015	13/8	567 m	9,8	5	8 084 (0,8117)	2,94 ($29,5 \cdot 10^{-5}$)	6 054 663 (607,9)
41734	ř. 386 + 24 vozů	1310	18/6	644	11,7	9	14 400 (1,12)	2,39 ($18,6 \cdot 10^{-5}$)	5 493 568 (427,57)
Střední hodnoty konstant:							12 670 (0,9585)	2,28 ($19,1 \cdot 10^{-5}$)	8 288 500 (615)

Z prostorových důvodů nejsou uvedeny jednotky jednotlivých konstant. V případě zájmu jsou uvedeny v popisu rovnice (23).

6.4.1 Hodnocení výsledků

Výsledný průběh rozšířeného vozidlového odporu byl porovnáván nejen jako celek, ale i jako součet jeho dílčích částí, tj. zvláště vozidlový odpor a odpor z jízdy v oblouku.

Porovnávány jsou vždy tři typy metod výpočtů:

- vztahy vycházející z předpisu ČSD V7 [7] a ČSN 736360-1 [8];
- odhad parametrů rozšířeného vozidlového odporu – absolutní konstanty vztahující se ke konkrétním vlakům (A , C a D);
- odhad parametrů rozšířeného vozidlového odporu – průměrné konstanty v měrném tvaru (a , c a d).

Graficky znázorněné průběhy sledovaných vlaků jsou obsaženy v přílohách č. 1 (42006), č. 2 (52271) a č. 3 (41734) tohoto dokumentu.

Porovnání vozidlových odporů

Porovnání vozidlových odporů vzhledem k jednoduchosti výpočtu proběhlo po celé délce sledovaného traťového úseku. Křivky charakterizující různé metody výpočtu vozidlových odporů mají stejné průběhy, avšak jsou vzájemně posunuty. Ačkoli konstanta A nabývá různých hodnot v řádu tisíců newtonů, nejpatrnější rozdíl křivek způsobí konstanta C . U vlaku 42006 je tato konstanta velice nízká, což způsobuje razantní rozdíl křivek. Vlaky 52271, 41734 jsou na tom o poznání lépe. Střední hodnotu C je nutné brát s nadhledem, jelikož ji velmi ovlivňuje právě vlak 42006. Jako reálnější se jeví střední hodnota vypočtená z vlaků 52171 a 41734 $C = 2,67 \text{ N} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{km}^{-2}$.

Snahou o co největší přesnost bylo u vlaku 41734 vyzkoušeno zkrácení délky dílčího úseku na poloviční délku, tj. 650 m. To se však neosvědčilo. Konstanty A , C a D vycházejí mimo předpokládané meze. Konstanta A vychází dokonce záporná, což odporuje fyzikální podstatě.

Porovnání odporu z jízdy v oblouku

Metodou odhadu parametrů je odpor z jízdy v oblouku podmíněn vytvořením náhradního úseku (zde s délkou 1300 m) a stanovení jeho náhradní křivosti. S výhodou bylo užito úseků s konstantní rychlostí, a tedy na vyobrazených grafech je porovnání spíše orientační právě ve zmiňovaných úsecích. Nevýhodou je vytvoření právě náhradní křivosti, což komplikuje i jeho dosazení do kontrolního výpočtu (nelze využít jednoduchosti numerického výpočtu v MS Excel). Pokud úsek zahrnuje úseky s rozmanitými poloměry oblouků, případně přímý úsek s nízkou četností oblouků, nejsou zohledněny špičky traťového odporu a tím dochází ke značným nepřesnostem. Kdyby ovšem došlo k rozdělení úseků po kratších vzdálenostech (např. 10 m), křivka by se velmi podobala předloze vypočtené dle dosavadního vztahu (13).

Porovnání rozšířeného vozidlového odporu

Porovnáním rozšířeného vozidlového odporu skutečného a vypočteného metodou odhadu parametrů je možné teprve určit, zdali dosavadní postup byl adekvátní. I když samotné porovnání je ovlivněno konstantní rychlostí (důsledek vybraných úseků odporu z jízdy v oblouku), je patrná podobnost obou křivek. Nesmíme ovšem opomenout vliv součtu vozidlového odporu a odporu z jízdy v oblouku, kdy zpravidla vyšší vozidlový odpor byl kompenzován nižším odporem z jízdy v oblouku (bráno vůči svým teoretickým hodnotám) a naopak.

6.4.2 Doporučený tvar vztahu rozšířeného vozidlového odporu

Úpravou vztahu (23) dochází k navrhovanému tvaru rovnice pro výpočet rozšířeného vozidlového odporu. První a druhý sčítanec charakterizuje vozidlový odpor, jehož první člen je závislý na tíze vlaku a druhý na kvadrátu rychlosti. Poslední sčítanec popisuje odpor z oblouku závislý také na tíze vlaku a křivosti náhradního úseku. Ačkoli by bylo možné (27) matematicky upravit, pro přehlednost je její tvar ponechán.

$$O_{RVO} = a \cdot G_v + C \cdot V^2 + d \cdot G_v \cdot \rho \quad (27).$$

6.4.3 Vliv úprav na stanovení jízdního odporu

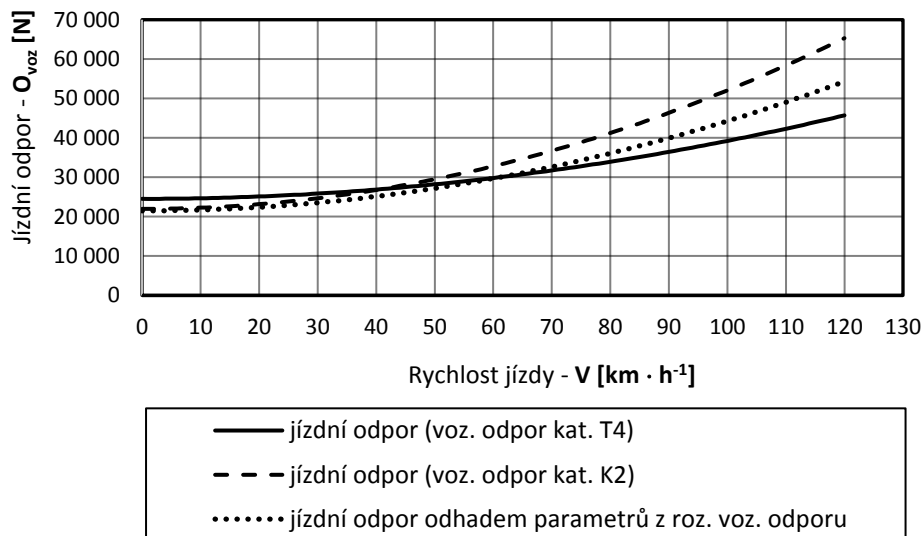
Tab. 4 shrnuje konstanty a početní vztahy potřebné k výpočtu jízdního odporu všemi metodami (kategorie K2 byla vybrána jako nejuniverzálnější pro provoz kontejnerových vlaků). Konstanta a zohledňující odpor z valení, v ložiskách a z nedokonale odlehklých zdrží vychází u nově sledované metody nejmenší. Jednou z příčin může být měření při jízdě vlaku v tahu, nikoli výběhem. Koeficient odporu z prostředí C je u nové metody řádově nižší nežli u vozidlového odporu K2, což mj. plyne z průměru získaných dat a jejich velkého rozptylu. Koeficient d charakterizující křivost úseku je svojí hodnotou nápadně blízký udávané konstantě v čitateli (13). Výpočty jízdního odporu s kategoriemi K2 a T4 musí být doplněny vztahem odporu z oblouku (13).

Tab. 4 Souhrn metod pro jízdní odpory včetně jejich potřebných konstant.

	vozidlový odpor		traťový odpor	
	a	C	d	odpor z oblouku
konstanty rozšířeného vozidlového odporu	0,96	2,28	615	–
konstanty vozidlového odporu K2	1,04	3,01	–	$\frac{600}{R}$
měrný vozidlový odpor T4	$O_{\text{voz_T4}} = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2$		–	$\frac{600}{R}$

HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ

Závěrem je graficky představeno, jak se provedené úpravy projeví v jízdním odporu. Uvažujme traťový úsek v oblouku ($R = 500$ m), s nulovým stoupáním a referenčním vlakem o celkové hmotnosti 1000 t. Spektrum rychlostí zahrnuje běžně využívané rychlosti kontejnerových vlaků.



Obr. 15 Porovnání průběhu jízdního odporu jednotlivých metod.

Velmi důležitým faktorem je hmotnost vlaku. S rostoucí hmotností mění nejrazantněji svůj průběh jízdní odpor s kategorií T4. To je dáno především nevhodnou závislostí aerodynamického odporu na tíže vlaku. Zbylé jízdní odpory mění svůj průběh vzhledem ke změně hmotnosti minimálně a s rostoucí rychlostí se jejich rozdíl zvětšuje.

7 Závěr

Úvodem práce je shrnutí základních pojmů a vztahů, z kterých vychází postupy trakční mechaniky. Je zde též představen a definován pojem rozšířený vozidlový odpor, jakožto soubor vybraných jízdních odporů bez striktního fyzikální odvození, kdy se pro běžné výpočty využívá empiricky naměřených vztahů.

Snahou definovat rozšířený vozidlový odpor bylo přistoupeno k odhadu jeho průběhu. Odhad spočíval ve vytvoření základní rovnice s třemi konstantami (a – odpor z valení, ložisek, nedokonale odlehlých zdrží; C – koeficient charakterizující odpor z prostředí; d – konstanta popisující křivost úseku) a aplikaci metody nejmenších čtverců v závislosti na rychlosti a poloměru (křivosti) oblouku. Konečné výsledky jednotlivých vlaků byly převedeny na měrný tvar a zprůměrovány. Výhodou výrazu rozšířeného vozidlového odporu je možnost opětovného „roztržení“ zvláště na vozidlový odpor a odpor traťový.

Vytvořením fiktivního úseku v oblouku o poloměru $R = 500$ m, nulovým stoupáním a referenčním vlakem o hmotnosti 1000 t je možné porovnat rozšířený vozidlový odpor a vozidlové odpory kategorie K2 a T4 ve spojení s dosavadním vztahem odporu z oblouku. Do rychlosti 50 km/h jsou jízdní odpory velmi podobné, ovšem při zvyšování rychlosti jsou rozdíly patrné. Největší jízdní odpor vykazuje uvažování K2, nejnižší pak odpor s T4.

Konstanty rozšířeného vozidlového odporu a a C dosahují nižších hodnot nežli konstanty u vozidlového odporu K2. Jistý rozdíl může činit fakt, že vlak jel po celou dobu měření v tahu, nikoli výběhem, jak tomu bylo u K2.

Konstanta d se velmi podobá čitateli v používaném vztahu pro výpočet odporu z jízdy v oblouku. I přesto bylo aplikací jiných metod zjištěno, že dosavadní vztah pro výpočet odporu z jízdy v oblouku je platný především pro úseky s oblouky malých poloměrů (přibližně do 700 m) a střední četností. U úseků s většími poloměry (nad 700 m) a vyšší četností, byly dosavadní vztahy vyhodnoceny jako zbytečně kritické.

Stejně tomu je u průjezdu tunelem. Při průjezdu kontejnerového vlaku jednokolejným tunelem o délce přibližně 500 metrů se skutečný jízdní odpor zvýší velmi nepatrně. Oproti tomu teoretické výsledky uvažují mnohdy odpor řádově vyšší o desítky procent.

Pro dosažení větší přesnosti měření by bylo zapotřebí provést analýzu většího souboru dat, s celým spektrem běžných rychlostí kontejnerových vlaků a různých traťových úseků s rozdílnými parametry.

Literatura

- [1] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOHOUT, M. *Mechanika dopravy: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, dislokované pracoviště Česká Třebová, 2013. ISBN 978-80-7395-739-1.
- [2] KRÁLÍK, P. *Vozidlový odpor současných kolejových vozidel*. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Tomáš Michálek.
- [3] MICHÁLEK, T., ŠIMRAL, P. Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2017. XXIII. konference s mezinárodní účastí. Sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017. s. 283-290.
- [4] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Teorie vozidel: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, dislokované pracoviště Česká Třebová, 2013. ISBN 978-80-7395-652-3.
- [5] IZER, J., JANDA, J., MARUNA, Z., ZDRŮBEK, S. *Kolejové vozy*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1985.
- [6] IZER, J. *Kolejové vozy: Dodatek*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1988.
- [7] FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY: ČSD V7. *Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982.
- [8] ČSN 736360-1:2008. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Projektování*. Praha: ČNI, 2008.
- [9] Curve resistance (railroad). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 20 September 2017 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Curve_resistance_\(railroad\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Curve_resistance_(railroad)).
- [10] Železniční trať Brno - Česká Třebová. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2017 [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.

Seznam příloh

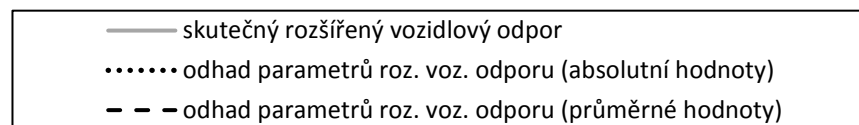
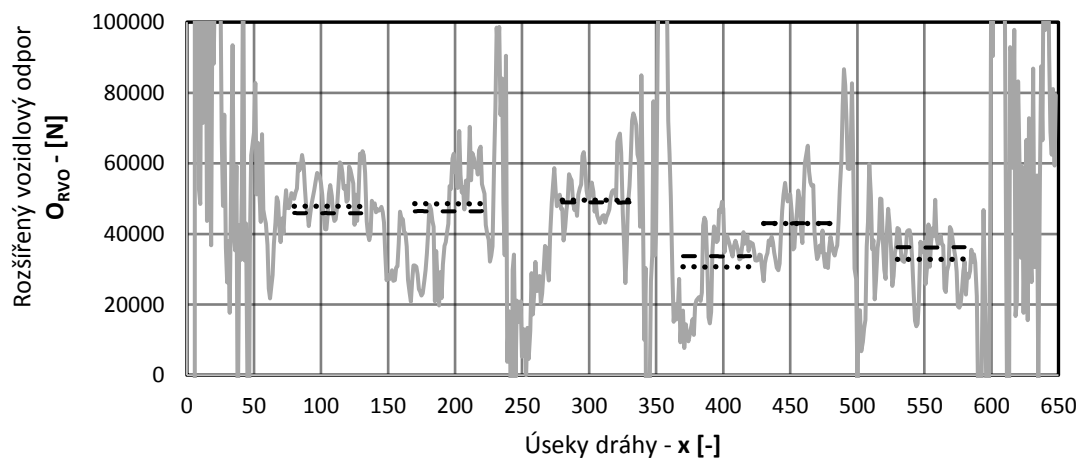
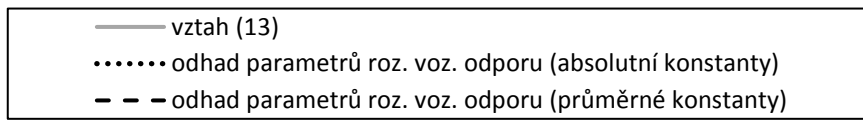
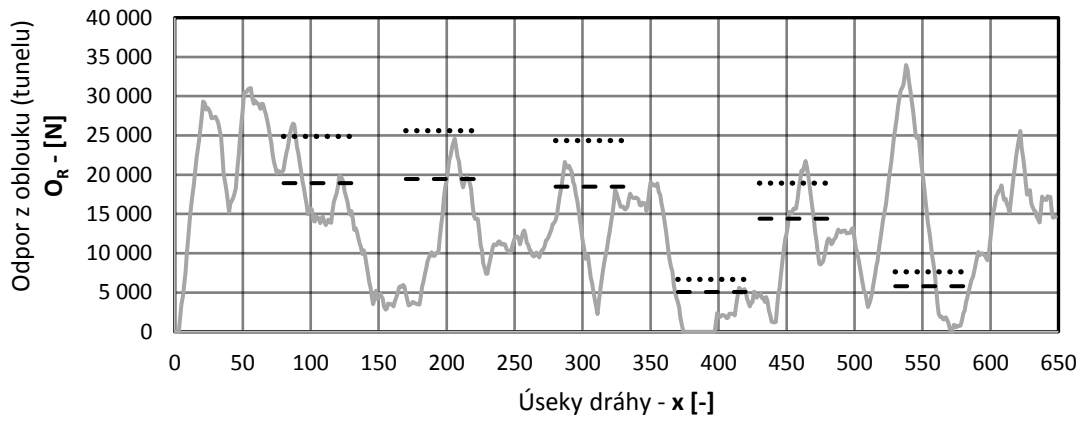
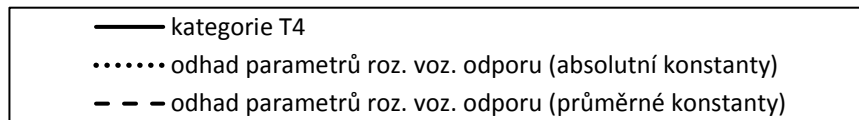
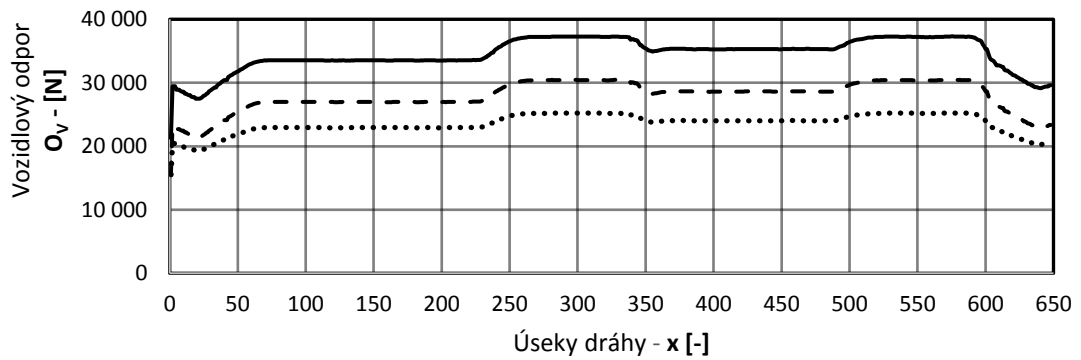
Příloha č. 1 – Grafické závislosti vlaku 42006

Příloha č. 2 – Grafické závislosti vlaku 52271

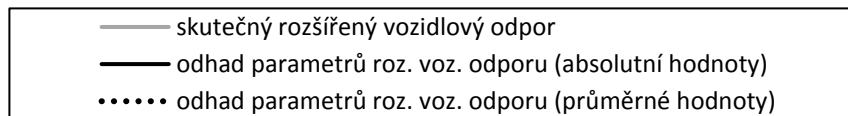
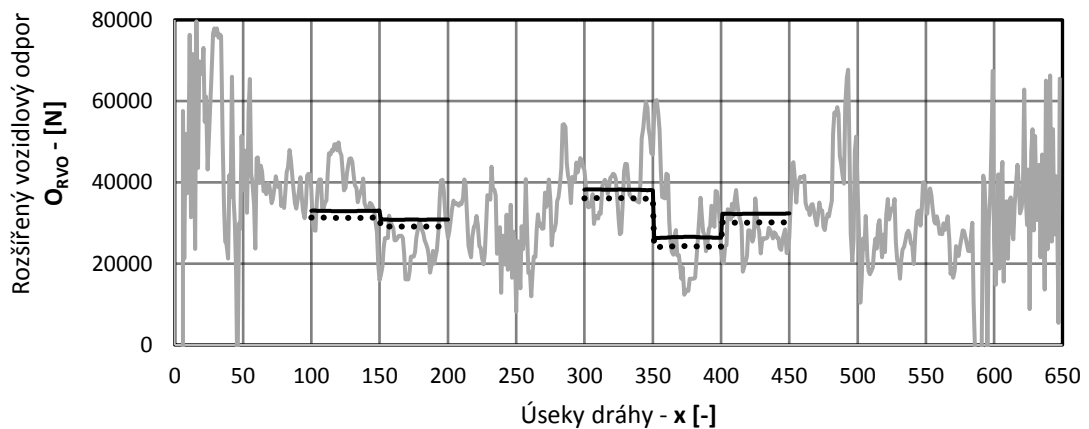
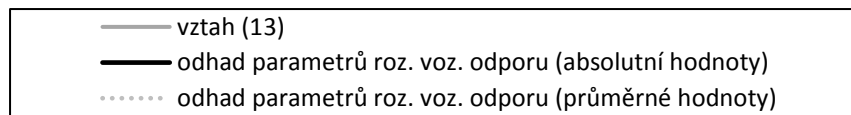
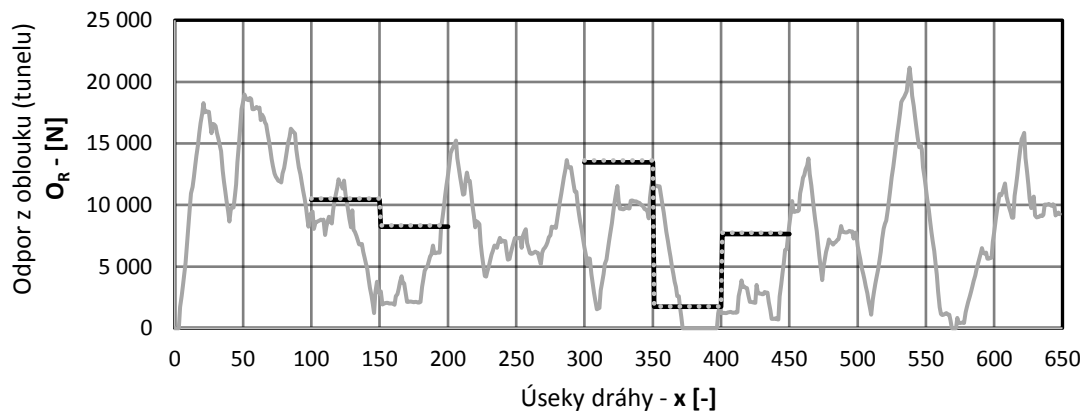
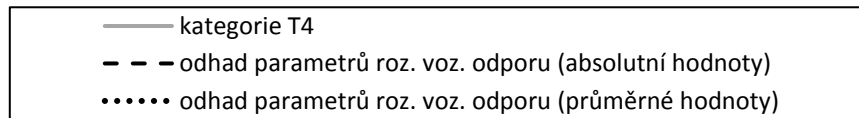
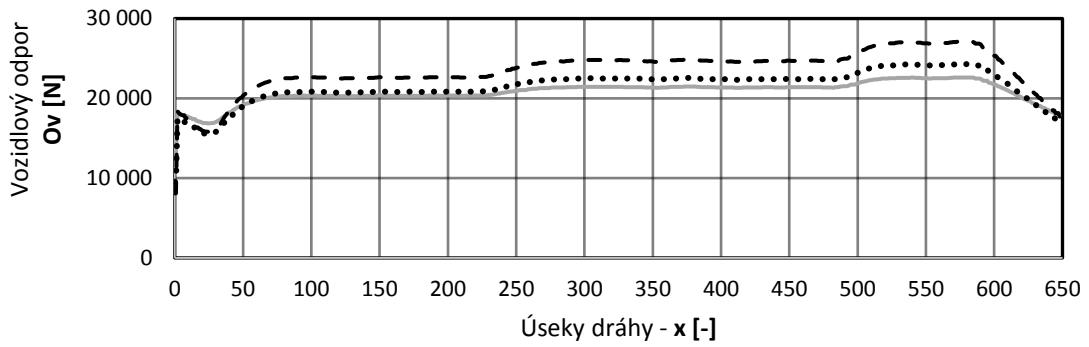
Příloha č. 3 – Grafické závislosti vlaku 41734

Příloha č. 4 – Početní rozbor jednotlivých vlaků

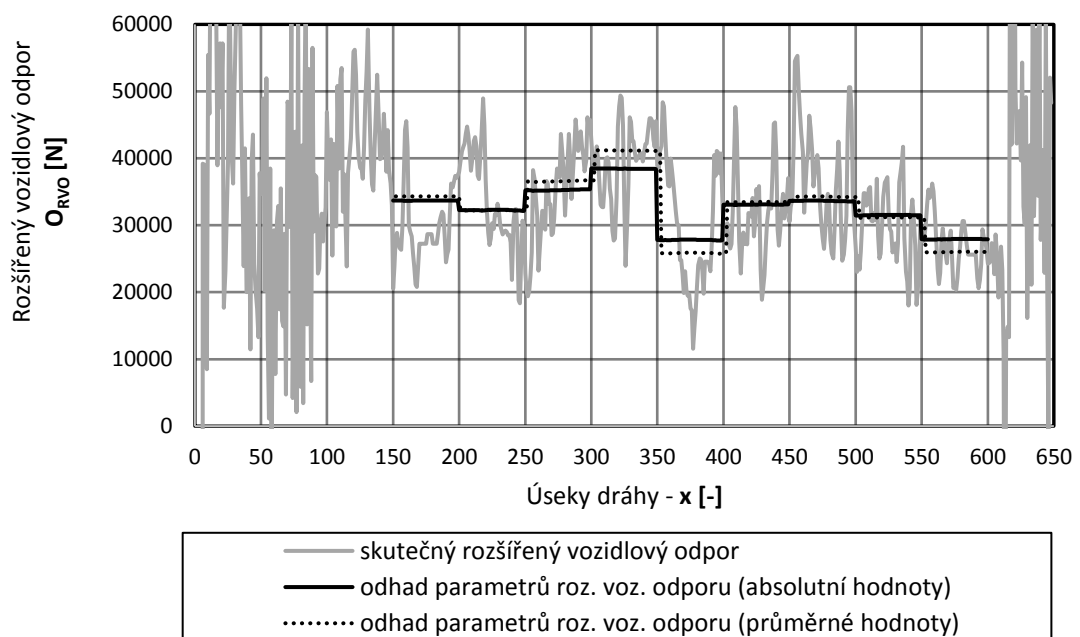
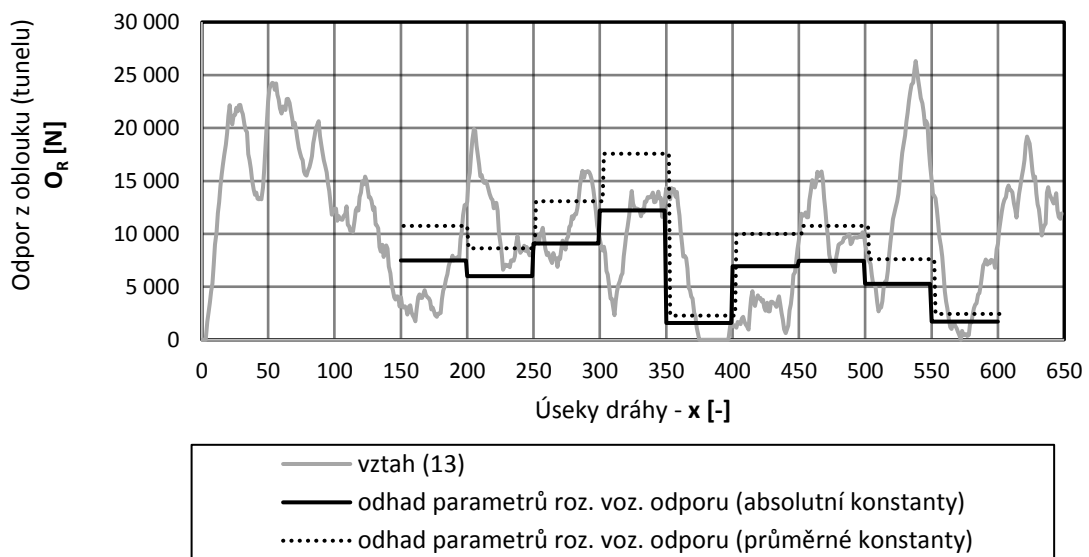
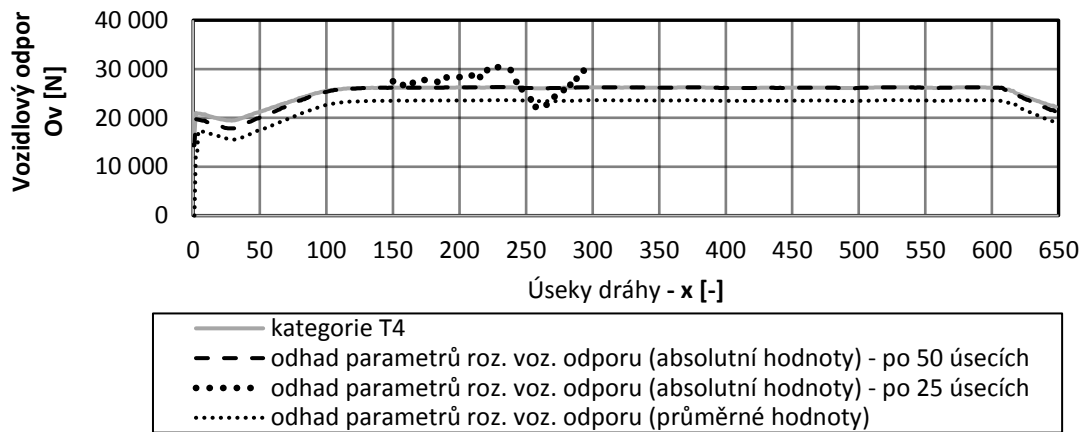
Příloha č. 1 – vlak č. 42006



Příloha č. 2 – vlak č. 52271



Příloha č. 3 – vlak č. 41734



Příloha č. 4 – početní rozbor jednotlivých vlaků

Úsek	42006 ($M_v = 1\,677\text{ t}$)			52271 ($M_v = 1\,015\text{ t}$)			41734 ($M_v = 1\,310\text{ t}$)		
	Rychlost [km/h]	Střední hodnota křivosti/poloměru [m ⁻¹ ; m]	Střední hodnota O_{RVO} [N]	Rychlost [km/h]	Střední hodnota křivosti/poloměru [m ⁻¹ ; m]	Střední hodnota O_{RVO} [N]	Rychlost [km/h]	Střední hodnota křivosti/poloměru [m ⁻¹ ; m]	Střední hodnota O_{RVO} [N]
80–130	70,1	0,001869/535,1	52 087,1	–	–	–	–	–	–
100–150	–	–	–	70,2	0,001721/581,1	38 415,2	–	–	–
150–200	–	–	–	70,3	0,001362/734,1	25 505,0	70,2	0,001362/734,1	29 774,3
170–220	70,1	0,001923/520,1	44 781,1	–	–	–	–	–	–
200–250	–	–	–	–	–	–	70,3	0,001093/914,7	33 832,8
250–300	–	–	–	–	–	–	70,0	0,001657/603,5	35 328,5
280–330	80,2	0,001827/547,3	49 919,8	–	–	–	–	–	–
300–350	–	–	–	75,3	0,002223/449,7	39 687,7	70,3	0,002223/449,7	39 489,0
350–400	–	–	–	75,2	0,000289/3 461,7	29 935,2	70,2	0,000289/3 461,7	29 902,7
370–420	75,1	0,000501/1 997,5	30 792,2	–	–	–	–	–	–
400–450	–	–	–	75,1	0,001264/791,3	27 290,2	70,0	0,001264/791,3	31 511,8
430–480	75,1	0,001422/703,1	41 917,4	–	–	–	–	–	–
450–500	–	–	–	–	–	–	70,1	0,001359/735,7	37 066,1
500–550	–	–	–	–	–	–	70,3	0,000962/1 039,8	29 628,8
530–580	80,1	0,000573/1 744,0	32 923,4	–	–	–	–	–	–
550–600	–	–	–	–	–	–	70,2	0,00031/3224,4	27 099,9